Modèle bidimensionnel couplé de Rangiroa (modèle hydrodynamique et modèle spectral de vague) – Cyclone tropical Orama-Nisha (1983)

CPS, Division géosciences et technologies appliquées

Septembre 2013

Hervé Damlamian & Jens Kruger

RAPPORT TECHNIQUE (PR166)

Département îles et océan

© Copyright Secrétariat général de la Communauté du Pacifique (CPS), 2013

Tous droits réservés de reproduction ou de traduction à des fins commerciales/lucratives, sous quelque forme que ce soit. Le Secrétariat général de la Communauté du Pacifique autorise la reproduction ou la traduction partielles de ce document à des fins scientifiques ou éducatives ou pour les besoins de la recherche, à condition qu'il soit fait mention de la CPS et de la source. L'autorisation de la reproduction et/ou de la traduction intégrale ou partielle de ce document, sous quelque forme que ce soit, à des fins commerciales/lucratives ou à titre gratuit, doit être sollicitée au préalable par écrit. Il est interdit de modifier ou de publier séparément des graphismes originaux de la CPS sans autorisation préalable.

Secrétariat général de la Communauté du Pacifique
Division géosciences et technologies appliquées
Private Mail Bag
GPO, Suva
Fidji
Téléphone : +679 338 1377
Télécopieur : +679 337 0040
www.sopac.org
director@sopac.org

SPC CPS
SECRETARIAT OF THE PACIFIC COMMUNITY
SECRÉTARIAT GÉNÉRAL DE LA COMMUNAUTÉ DU PACIFIQUE

CPS, Division géosciences et technologies appliquées

Modèle bidimensionnel couplé de Rangiroa (modèle hydrodynamique et modèle spectral de vague) – Cyclone tropical Orama-Nisha (1983)

RAPPORT TECHNIQUE (PR166)

Hervé Damlamian & Jens Kruger

Septembre 2013

Département îles et océan

AVERTISSEMENT

Bien que les données contenues dans le présent rapport aient été recueillies, analysées et rassemblées avec le plus grand soin, la Division géosciences et technologies appliquées (SOPAC) du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique (CPS) ne saurait être tenue responsable en cas de perte ou de préjudice découlant de leur utilisation.

AVIS IMPORTANT

Ce document a été produit avec le concours financier de l'Union européenne, dans le cadre du Projet Soutien à la réduction des risques de catastrophes dans les Pays et Territoires d'outre-mer du Pacifique, financé au titre de l'enveloppe C du neuvième Fonds européen de développement.

Le contenu du présent document n'engage que la responsabilité du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique et ne peut en aucun cas être interprété comme une prise de position de l'Union européenne.

Ces travaux ont été réalisés par la Division géosciences et technologies appliquées (SOPAC) en collaboration avec le Service de l'urbanisme de la Polynésie française.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ 2

1 INTRODUCTION 3

2 MÉTHODOLOGIE 4

2.1 Modèle couplé (module hydrodynamique et analyse spectrale de la houle) à maillage flexible – MIKE21 de DHI 4

2.2 Modèle XBeach 5

3 DOMAINE À MAILLAGE FLEXIBLE 6

3.1 Domaine de Rangiroa 6

3.2 Données dispersées et interpolation 6

3.3 Élargissement du domaine 9

4 CALIBRATION 14

4.1 Recueil de données océanographiques 14

4.2 Observations relatives au paramétrage, à la calibration et à la sensibilité du modèle 15

5 APPLICATION : CYCLONE ORAMA-NISHA 19

5.1 Production de séries chronologiques bidimensionnelles du champ de vent et du champ de pression associés au cyclone Orama-Nisha 19

5.2 Résultats 21

6 MODÉLISATION DES SUBMERSIONS MARINES DANS XBEACH 25

6.1 Paramétrage du modèle 25

6.2 Résultats 25

6.3 Résonance dans le lagon 28

7 CONCLUSION 31

8 SOURCES 32

9 ANNEXES 33

ANNEXE A : BATHYMÉTRIE DÉRIVÉE DE L'IMAGE SATELLITE THEOS 33

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet financé par l'Union européenne (UE) *Soutien à la réduction des risques de catastrophes dans les Pays et Territoires d'outre-mer du Pacifique*, le gouvernement de la Polynésie française a demandé à la Division géosciences et technologies appliquées (SOPAC) du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique (CPS) d'étudier l'impact du cyclone Orama-Nisha survenu en 1983 sur l'atoll de Rangiroa.

Un modèle numérique couplant les vagues et les courants a tout d'abord été mis au point grâce à la suite logicielle MIKE21. Il a été calibré à l'aide de données océanographiques recueillies au cours d'une campagne menée sur le terrain pendant six mois (voir rapport complémentaire détaillant l'acquisition des données océanographiques). Les conditions météorologiques associées au cyclone Orama-Nisha ont ensuite été utilisées pour forcer le modèle. Lors du cyclone Orama-Nisha, d'après le modèle, une vague de 5,8 m a été générée côté océan, face à Avatoru. Dans la partie méridionale de Rangiroa, une vague plus importante (hauteur de houle significative Hs = 8 à 9 m) a créé une forte surcote au niveau du récif sud, entre 1,5 m et 2 m environ.

Au large d'Avatoru, sous l'effet combiné de la marée et de la pression atmosphérique, la surcote a atteint 0,7 m. Dans le lagon, sous l'influence de la marée, de l'ensachage, de la pression atmosphérique et de la contrainte du vent, le niveau d'eau s'est élevé de 1,7 m par rapport au niveau moyen de la mer. Au pic du cyclone, le vent soufflait à plus de 26 m/s au-dessus du lagon en direction de l'est, créant ainsi un fort gradient d'élévation du plan d'eau d'à peu près 80 cm, avec une élévation de la surface libre d'environ 1,3 m dans la partie occidentale et de plus de 2,1 m dans la partie orientale.

Le forçage des vents s'est atténué au fur et à mesure que le cyclone se déplaçait vers le sud de Rangiroa, sans toutefois provoquer de phénomène de seiche d'après les simulations. Cependant, étant donné qu'une valeur constante pour le rayon de vent maximum (47 km) a été utilisée à chaque stade du cyclone, on a obtenu une diminution peu marquée et quasi linéaire du forçage des vents, rendant impossible la survenue d'une seiche.

Enfin, les conditions de pic du cyclone aux alentours de la zone habitée ont été extraites et utilisées comme conditions aux limites dans le modèle XBeach, en vue d'évaluer de manière approximative la submersion engendrée par le phénomène. Le modèle XBeach a montré que la submersion s'était uniquement produite dans le lagon, ce qui coïncide avec l'unique témoignage recueilli par nos soins. Le champ de houle du large n'a eu qu'un effet très limité sur l'îlot habité.

1 INTRODUCTION

Rangiroa est le deuxième plus grand atoll au monde et le centre urbain de l'archipel des Tuamotu. Deux de ses îlots situés à la pointe nord sont habités en permanence et rassemblent quelque 2 500 habitants. Cet atoll de forme elliptique s'étend sur environ 80 km de longueur et entre 5 et 32 km de largeur. Il renferme un lagon d'à peu près 1 450 km².

Le lagon est relié à l'océan par deux passes principales, la passe de Tiputa et la passe d'Avatoru, au nord de l'atoll. La jonction entre le lagon et l'océan se fait également par le biais de nombreux *hoa*, des chenaux étroits situés sur la ceinture de l'atoll, de même que via le platier récifal lorsque celui-ci est submergé par des vagues.

Durant la saison cyclonique 1982-1983, plusieurs cyclones intenses ont frappé l'atoll de Rangiroa : Lisa, Nano, Orama, Veena et William. Bien qu'une fréquence aussi élevée reste tout à fait exceptionnelle, ces phénomènes ont mis en évidence la nécessité de renforcer la préparation et la sensibilisation aux situations d'urgence.

Dans le cadre du projet financé par l'UE *Soutien à la réduction des risques de catastrophes dans les Pays et Territoires d'outre-mer du Pacifique*, le gouvernement de la Polynésie française a demandé à la Division SOPAC de la CPS d'étudier les incidences du cyclone Orama-Nisha survenu en 1983 sur l'atoll de Rangiroa. Un modèle numérique a été mis au point afin d'améliorer la compréhension de l'état de mer dans le lagon lors d'un cyclone : il a permis d'obtenir des données extrêmement intéressantes qui devraient appuyer les actions de sensibilisation de la population. Par ailleurs, le modèle bidimensionnel établi pour Rangiroa pourra être consulté lors de l'élaboration de projets de gestion du littoral dans le lagon de Rangiroa.

La Division SOPAC de la CPS, en collaboration avec le gouvernement de la Polynésie française et avec le concours de GéoPolynésie, une société locale, a mené pendant six mois une vaste campagne d'acquisitions de données à Rangiroa. Divers types de données ont été recueillies : données monofaisceaux et multifaisceaux, données GPS-RTK (c'est-à-dire obtenues à l'aide d'un GPS cinématique en temps réel), et données océanographiques.

Les données en question ont servi à réaliser des simulations relatives à l'atoll, en couplant un modèle spectral de vague avec un modèle de courant à l'aide du logiciel MIKE 21 développé par DHI. Après calibration, les conditions connues du cyclone Orama-Nisha ont été forcées dans le modèle (base de données IBTrACS [International Best Track Archive for Climate Stewardship], www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/).

2 MÉTHODOLOGIE

Étudier les caractéristiques hydrodynamiques et le risque de submersion associés à un cyclone violent frappant l'atoll de Rangiroa nécessite de bien appréhender les forces dominantes et les mécanismes à l'œuvre durant un tel phénomène.

Afin d'évaluer le risque de submersion marine, on classe les états de mer caractéristiques des épisodes cycloniques en deux catégories :

- Onde de tempête : élévation du niveau de la mer résultant d'une modification de la pression atmosphérique et de la surcote due aux vents.
- Marée de tempête : vague provoquée par la pression des vents cycloniques, se propageant sur la surface de la mer.

De plus, durant un épisode de ce type, présentant des vents violents et une forte houle, on s'attend à ce que les phénomènes ci-après surviennent :

- Vitesse élevée des courants de surface ;
- Ensachage important du lagon ;
- Forte surcote due aux vents dans le lagon.

Les marées ne devraient quant à elles jouer qu'un rôle secondaire, en modulant le niveau de la mer au large.

Un module hydrodynamique couplé à une analyse spectrale de la houle a été retenu en vue de modéliser les mécanismes susmentionnés, notamment la génération des vagues et l'onde de tempête, ainsi que les interactions entre les vagues, le niveau de la mer et les courants.

Il convient de préciser qu'il est délicat de modéliser un atoll de grande taille comme celui de Rangiroa, en raison de sa géomorphologie. L'atoll est en effet bordé par une pente escarpée. Si l'on veut réussir à simuler correctement la transformation des vagues dans la zone de déferlement, le choix d'une résolution élevée s'impose pour la pente récifale.

Une méthode efficace consiste à recourir à un maillage flexible triangulaire pour le domaine de calcul, de manière à tenir compte des différentes résolutions requises sur l'ensemble du domaine, tout en maintenant des temps de calcul raisonnables.

Aux fins de la présente étude, c'est le programme de modélisation MIKE21 élaboré par DHI qui a été choisi, car il permet d'opter pour un maillage flexible et d'associer un module d'analyse spectrale de la houle à un module hydrodynamique.

Aucune donnée océanographique n'avait été enregistrée à Rangiroa durant le cyclone Orama-Nisha. La calibration du modèle a donc été réalisée sur la base des données recueillies lors de la campagne conduite pendant six mois, de juillet à décembre 2012 (acquisition des données océanographiques détaillée dans un rapport technique complémentaire). Le domaine a ensuite été élargi afin d'y inclure la trajectoire du cyclone. Pour ce faire, on a ajouté des mailles en périphérie du domaine initial, sans modifier la grille de maillage calibrée.

Enfin, un modèle XBeach a été établi en vue de déterminer le risque de submersion sur la bande Avatoru-Tiputa. Les conditions de la houle et du niveau d'eau ont été tirées du modèle couplé et ont servi de paramètres d'entrée dans XBeach. Étant donné qu'une seule condition aux limites pouvait être intégrée dans XBeach pour ce qui est de la houle, des modèles distincts ont été établis pour la submersion côté lagon et côté océan.

2.1 Modèle couplé (module hydrodynamique et analyse spectrale de la houle) à maillage flexible – MIKE21 de DHI

Le modèle couplé MIKE21 (maillage flexible) est un système dynamique composé de sept modules, notamment le module hydrodynamique et le module d'analyse spectrale de la houle.

Le module hydrodynamique et le module d'analyse spectrale de la houle sont combinés, ou couplés, afin de simuler de manière dynamique les interactions entre les vagues et les courants.

Conçu en deux dimensions, le module hydrodynamique repose sur les équations de Saint-Venant. Il permet notamment de déterminer les éléments suivants :

- Submersion et exondation, afin de modéliser de façon précise l'hydrodynamique du platier récifal sur l'ensemble de l'atoll ;
- Gradients de pression barométrique et cisaillement du vent, de manière à simuler la marée de tempête ;
- Contrainte de radiation, afin de prendre en considération l'ensachage du lagon.

Le module d'analyse spectrale de la houle (Spectral Wave ou SW) simule la croissance, la décroissance et la transformation des vagues et de la houle produites par le vent au large et au niveau des zones côtières. Il tient notamment compte des composantes ci-après :

- Croissance des vagues sous l'action du vent ;
- Interactions vagues-vagues non linéaires ;
- Dissipation due au déferlement des vagues induit par la profondeur, au frottement avec le fond et au moutonnement ;
- Réfraction et perte d'amplitude (shoaling) entraînées par la variation de la profondeur.

Compte tenu du rôle crucial joué par la dissipation due au déferlement des vagues et à la rugosité du fond dans la calibration du modèle, les équations associées à ce paramètre sont données.

- On calcule la dissipation de l'énergie de la houle par frottement avec le fond de la manière suivante :

$$S_{bot}(f,\theta) = -\left(C_f + \frac{f_c(\bar{u}.\bar{k})}{k}\right)\frac{k}{\sinh 2kd}\,E(f,\theta)$$

Où C_f représente le coefficient de frottement, k le nombre d'ondes, d la profondeur d'eau, f_c le coefficient de frottement pour le courant, et u la vitesse des courants.

Le coefficient de frottement se calcule comme suit : $C_f = f_w\, u_b$, où u_b désigne la vitesse orbitale quadratique moyenne de la houle au fond. De plus, le facteur de frottement, f_w, est fonction d'une valeur constante de rugosité géométrique Kn, calculée à l'aide de l'expression établie par Jonsson et Carlsen (1966) :

$$f_w = e^{-5.977+5.213\,(\frac{a_b}{k_n})^{-0.194}} \quad \text{for} \quad \frac{a_b}{Kn} \geq 2.016389$$

$$f_w = 0.24 \quad \text{for} \quad \frac{a_b}{Kn} < 2.016389$$

Où a_b représente le mouvement orbital au fond. La valeur constante Kn sert à calibrer le taux de dissipation par frottement avec le fond.

- Le modèle de dissipation de l'énergie de la houle due au déferlement est donné par Battjes et Janssen (1978). Le terme source s'exprime de la façon suivante, d'après Eldeberky et Battjes (1996) :

$$S_{surf}(f,\theta) = -\frac{2\,\alpha_{BJ}\,Q_b\,\overline{f}}{X}\,E(f,\theta)$$

Où α_{BJ}≈1.0 est une constante de calibration, Q_b désigne la fraction des vagues déferlantes, $\overline{f}$ représente la fréquence moyenne, et X est le rapport entre l'énergie totale dans le train de houle aléatoire et l'énergie dans un train de houle présentant la plus grande hauteur de vague envisageable. La hauteur de houle maximale dépend du paramètre de déferlement γ: $H_{max} = \gamma d$, où d correspond à la profondeur d'eau. Le paramètre de déferlement γ sert de paramètre de calibration.

Pour ce qui est de l'analyse spectrale de la houle, les calculs peuvent être réalisés à l'aide d'une formulation paramétrique à découplage directionnel ou d'une formulation entièrement spectrale. Les formulations entièrement spectrales sont basées sur l'équation de conservation de l'action d'onde décrite par Komen et al. (1994) et Young (1999).

Si vous souhaitez obtenir des informations plus détaillées, veuillez vous référer au manuel d'utilisation du logiciel MIKE21 (en anglais).

2.2 Modèle XBeach

Consulter le rapport technique sur les submersions marines d'origine cyclonique élaboré par la Division SOPAC.

3 DOMAINE À MAILLAGE FLEXIBLE

La composante « maillage flexible » procure un degré de flexibilité optimal pour décrire les caractéristiques bathymétriques, l'écoulement ambiant et les conditions de houle. On a en effet recours à des maillages non structurés tenant compte des limites et de la profondeur.

Lorsque le domaine étudié est vaste, comme c'est le cas pour l'atoll de Rangiroa, il faut veiller à choisir la solution la mieux adaptée, de manière à trouver le bon compromis entre résolution/précision du modèle et temps de calcul raisonnables.

3.1 Domaine de Rangiroa

Durant la phase de calibration, le domaine de calcul a été limité à Rangiroa et à ses environs immédiats afin de réduire la durée de calcul. Une calibration de qualité nécessite d'exécuter de nombreux modèles, ce qui peut être contraignant en termes de temps.

Le domaine demeure néanmoins assez vaste : 160 km en abscisse et 90 km en ordonnée. Il comprend 101 968 éléments et 52 789 nœuds.

Le récif nord de Rangiroa se compose de nombreux îlots séparés par d'étroits chenaux intertidaux. En revanche, le récif sud comporte un nombre très limité d'îlots, ce qui entraîne des échanges hydrologiques considérables entre l'océan et le lagon.

Au nord, la plupart des îlots ont été réunis afin de simplifier le domaine. De plus, nous n'avons pas tenu compte des chenaux intertidaux étroits entre les îlots dont la bathymétrie complexe n'a pas été étudiée, ce qui a permis d'éviter de créer des mailles très fines et, partant, de limiter les temps de calcul. Quatre ouvertures seulement, situées au nord, ont été prises en considération : les deux passes profondes de Tiputa et d'Avatoru, et deux passes peu profondes, mais relativement larges au nord-est (550 m et 1 km).

La résolution du domaine varie selon les zones. La pente récifale, la crête récifale et les passes de Tiputa et d'Avatoru sont délimitées par des mailles triangulaires contraintes sur une superficie maximale de 2 000 m^2.

Pour le platier sud, la résolution du maillage ne dépasse pas 10 000 m^2. Dans le lagon, la vaste étendue d'eau peu profonde le long du littoral présente une résolution de 60 000 m^2. Étant donné que l'eau est assez profonde au milieu du lagon (plus de 30 m), la résolution maximale a été fixée à 250 000 m^2. La résolution du maillage a toutefois été affinée autour des principales patates de corail.

Enfin, à partir de 200 m de profondeur, on a progressivement réduit la résolution, jusqu'à un maximum de 2 km^2. Différentes perspectives du maillage flexible sont représentées ci-après (Figure 1, Figure 2, Figure 3 et Figure 4).

3.2 Données dispersées et interpolation

Plusieurs sources de données ont été utilisées afin d'établir la bathymétrie du domaine :

- Données multifaisceaux (Figure 15) ;
- Données monofaisceaux le long de la bande Avatoru-Tiputa, dont le tracé est indiqué à la Figure 7 ;
- Données RTK au niveau du platier récifal. Le transect est visible à la Figure 7 ;
- Données bathymétriques d'origine satellitaire pour les eaux peu profondes et les patates coralliennes, qui apparaissent clairement à la Figure 7.
- Données bathymétriques moins précises tirées de Sandwell pour le large.

Les données multifaisceaux n'ont pas été recueillies sur l'ensemble de la pente récifale (voir rapport technique). La zone de couverture correspondante est représentée à la Figure 15. En vue de déterminer la bathymétrie des parties non étudiées sur la pente récifale, on a calculé la distance moyenne entre la crête récifale et trois courbes de niveau (- 20 m, - 85 m, et - 250 m) pour le jeu de données multifaisceaux. La crête récifale a ensuite été numérisée à l'aide d'une polyligne. On a appliqué à la polyligne une zone tampon égale à la distance moyenne de chacune des trois courbes. Les polylignes ainsi obtenues ont été utilisées comme courbes de niveau à - 20 m, - 85 m et - 250 m pour les zones de la pente récifale où aucun relevé n'avait été effectué.

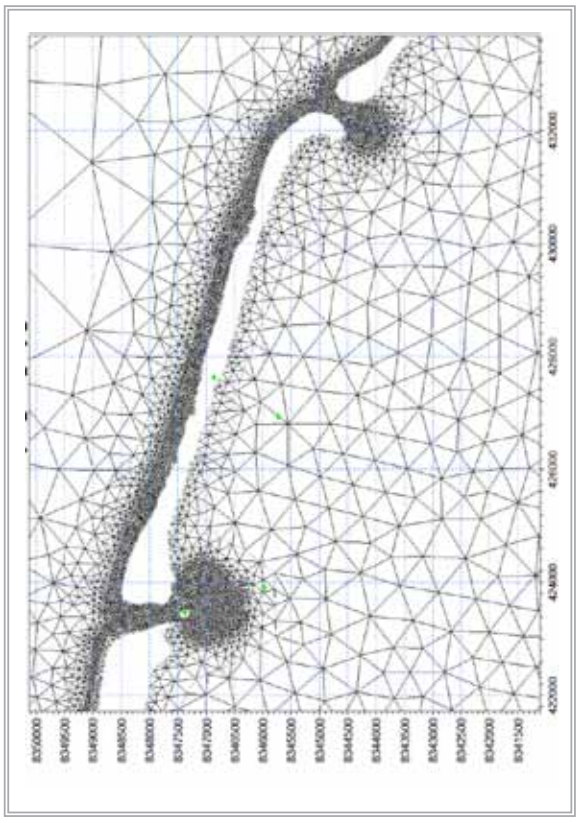


Figure 1 : Maillage triangulaire flexible de l'atoll de Rangiroa.

Figure 2 : Maillage flexible au niveau de la bande Tiputa-Avatoru.

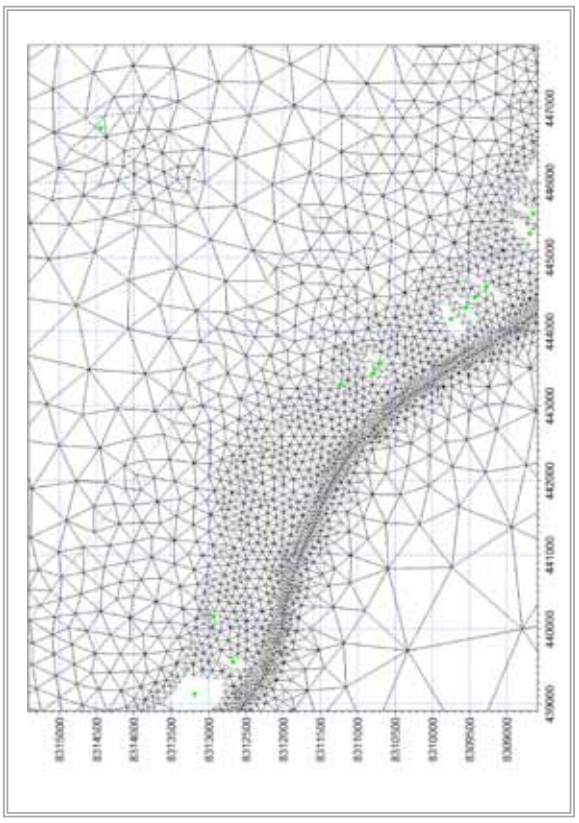


Figure 3 : Maillage flexible au niveau du récif sud. En haut à droite, le maillage a été affiné afin d'inclure une patate de corail.

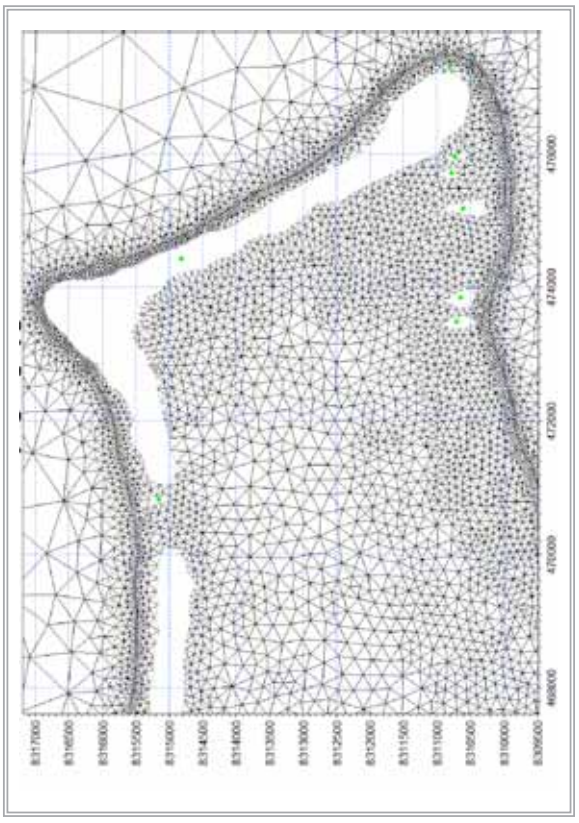


Figure 4 : Maillage flexible dans la partie orientale de Rangiroa.

Afin de faciliter l'interpolation, un certain nombre de données dispersées ont été saisies manuellement pour la partie la plus à l'est de Rangiroa et pour le platier récifal sud. Une zone intertidale assez grande à l'extrémité orientale du lagon n'a pas été sondée. Des points ont été ajoutés à partir de relevés de profondeur réalisés dans les alentours et en fonction de la couleur des pixels apparaissant sur l'image enregistrée par le satellite THEOS. Une méthode similaire a été adoptée afin d'intégrer davantage de points au niveau du platier sud.

Figure 6 : Données dispersées pour la partie orientale de Rangiroa.

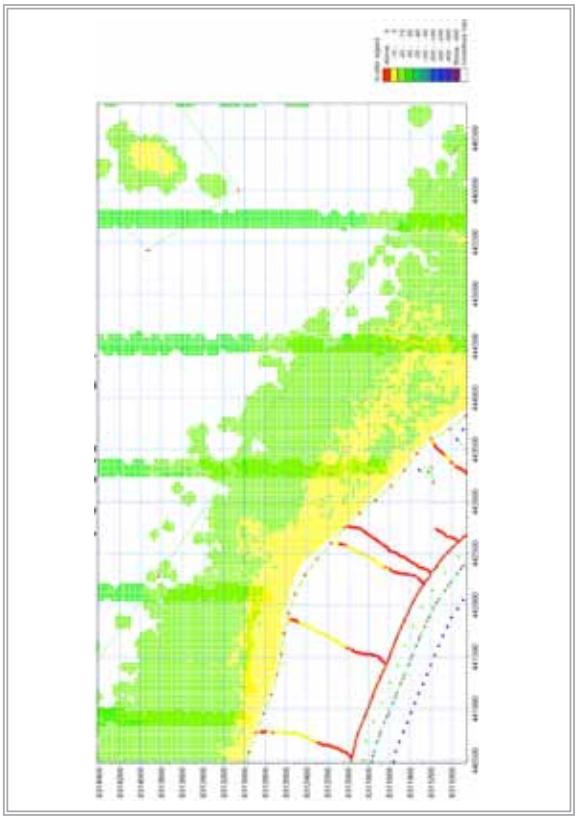


Figure 8 : Données dispersées pour le sud de Rangiroa.

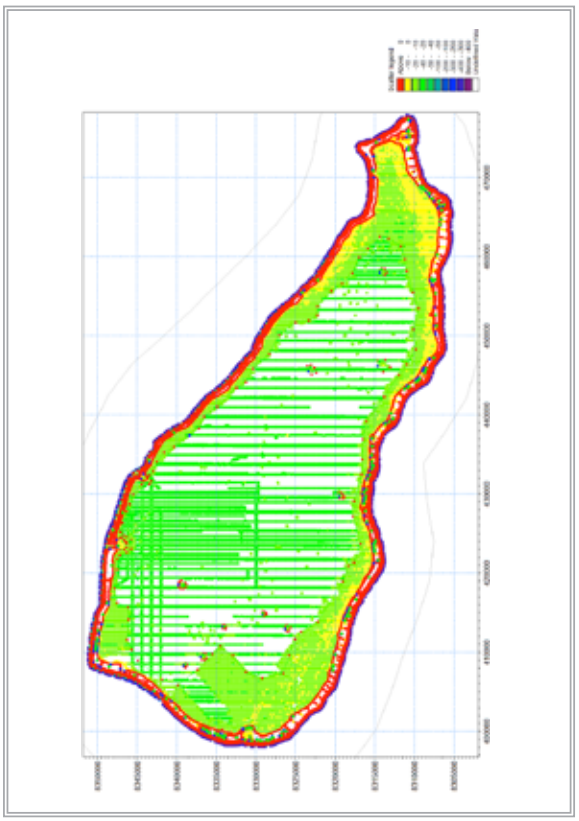


Figure 5 : Ensemble des données dispersées pour l'atoll de Rangiroa.

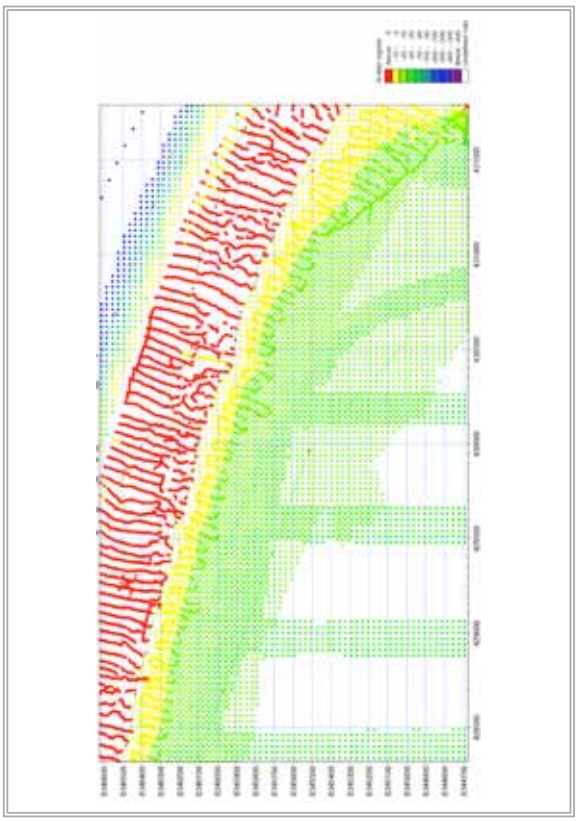


Figure 7 : Données dispersées au niveau de la bande Tiputa-Avatoru. Les points rouges correspondent aux données RTK. Les points des bandes vertes verticales et les données côté océan (en bleu) sont des données multifaisceaux. Les données monofaisceaux sont facilement identifiables à proximité de la côte (en jaune et en vert). Les données restantes ont été obtenues à l'aide d'images satellites.

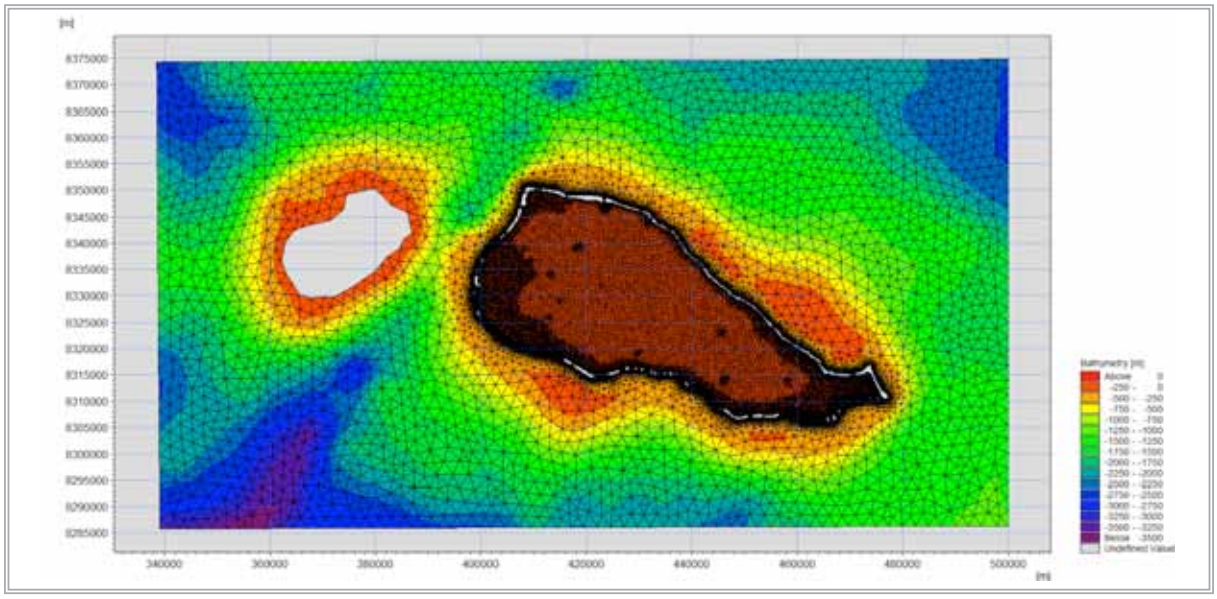


Figure 9 : Bathymétrie de l'atoll de Rangiroa représentée sous la forme d'un maillage triangulaire. La profondeur, en mètres, est indiquée du moins profond (en rouge) au plus profond (en bleu).

Dans le sud, on a là aussi numérisé l'extrémité supérieure de la pente entre la zone intertidale et le lagon, et une profondeur de - 0,3 m a été attribuée.

Pour finir, la crête récifale a également été numérisée tout autour de l'atoll, de manière à densifier les données RTK et à améliorer l'interpolation.

En vue d'interpoler les données dispersées sur le maillage flexible, on a établi des lignes d'arrêt et défini des zones prioritaires de manière locale et générale.

Deux lignes d'arrêt ont été fixées :

- La crête récifale ;
- L'extrémité supérieure de la pente entre le lagon et la zone intertidale dans le sud.

Une fois les données dispersées hiérarchisées de manière générale, les données multifaisceaux, les données RTK, les données monofaisceaux et les données bathymétriques d'origine satellitaire présentent une importance réduite. Cependant, des règles de priorisation ont également été fixées au niveau local, notamment en ce qui concerne les patates de corail pour lesquelles les données recueillies par satellite sont cruciales.

Nous avons utilisé la méthode de Sibson (interpolation « par voisins naturels »), ce qui a permis d'extrapoler au-delà de l'enveloppe convexe des données dispersées (surface de délimitation : 1 000 %). Les résultats de l'interpolation sont fournis à la Figure 9.

3.3 Élargissement du domaine

Au vu de l'étendue du domaine requis pour la modélisation du cyclone Orama-Nisha, le domaine initial axé sur Rangiroa (ci-après « domaine-1 ») a dû être élargi de manière notable, afin d'y intégrer la trajectoire du cyclone et la propagation de la houle cyclonique.

Comme la calibration avait été réalisée pour le domaine-1, on s'est employé à conserver tel quel le maillage triangulaire lors de l'extension du domaine.

Les dimensions du domaine ont ainsi été modifiées à 6 degrés de latitude (de - 18,5 à - 12,5) et à 6,5 degrés de longitude (de - 149,5 à - 143). Le domaine comprend à présent 89 811 nœuds et 174 646 triangles.

La résolution des mailles triangulaires ajoutées autour de la grille existante est moins précise, avec une surface autorisée maximale de 0,0008 degré carré par élément (environ 5 km2).

Les autres atolls pris en compte ont été numérisés et représentés dans le domaine sous la forme de trous.

Enfin, alors que la profondeur de chaque nœud du domaine-1 a été conservée, celle des nœuds périphériques a été définie par interpolation des données bathymétriques de Sandwell, à l'aide d'un schéma linéaire. Aux quatre limites du domaine, les données dispersées ont été remplacées par une valeur constante de 4 000 m de profondeur, de manière à renforcer la stabilité du modèle. La représentation tridimensionnelle de la bathymétrie obtenue est visible à la Figure 10.

Figure 10 : Représentation tridimensionnelle de la bathymétrie du domaine réalisée dans le cadre de la modélisation des effets du cyclone Orama-Nisha sur l'atoll de Rangiroa. Profondeur en mètres.

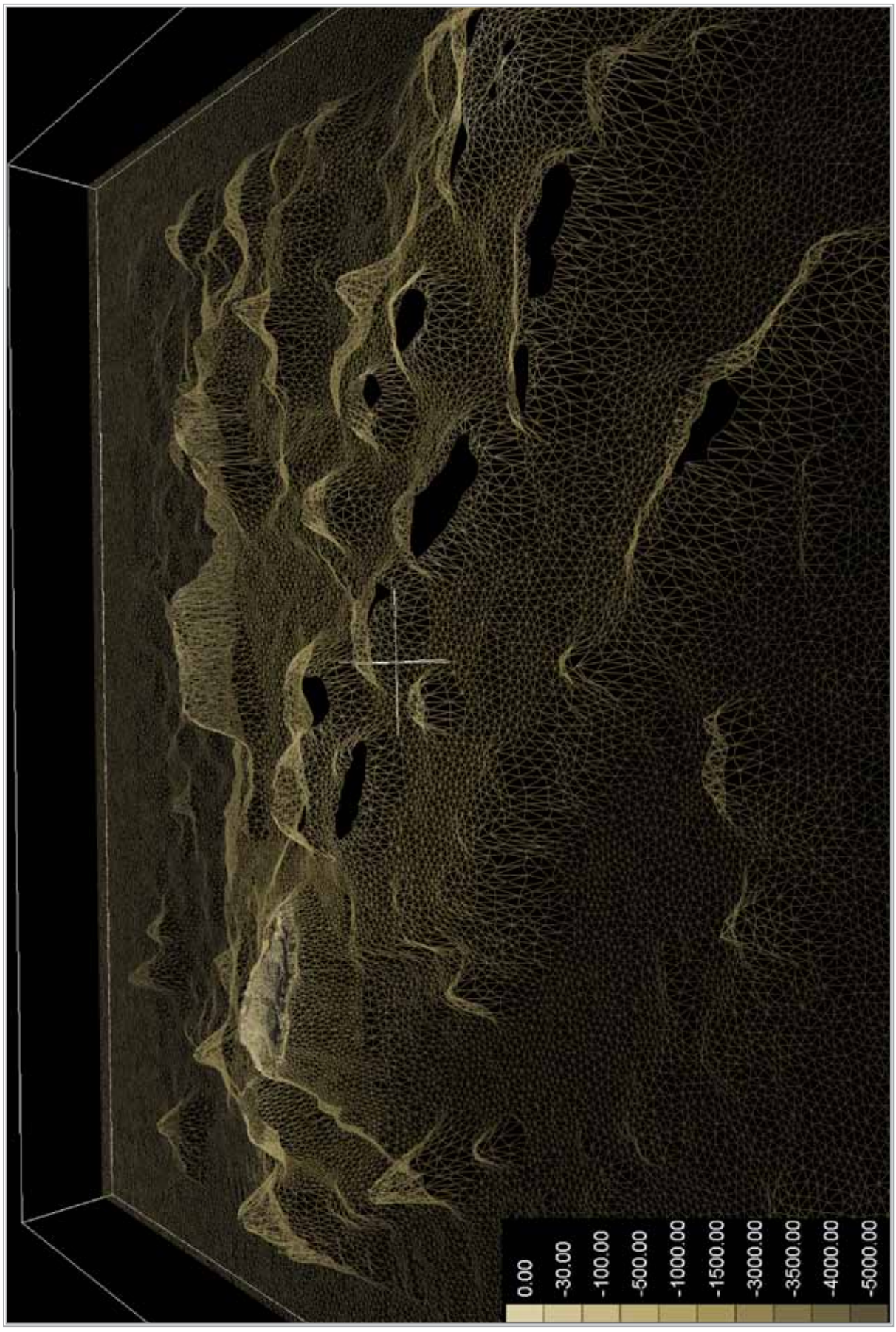


Figure 11 : Représentation tridimensionnelle d'une grille à maillage flexible produite dans le cadre de la modélisation des effets du cyclone Orama-Nisha sur l'atoll de Rangiroa. La profondeur n'est pas précisée.

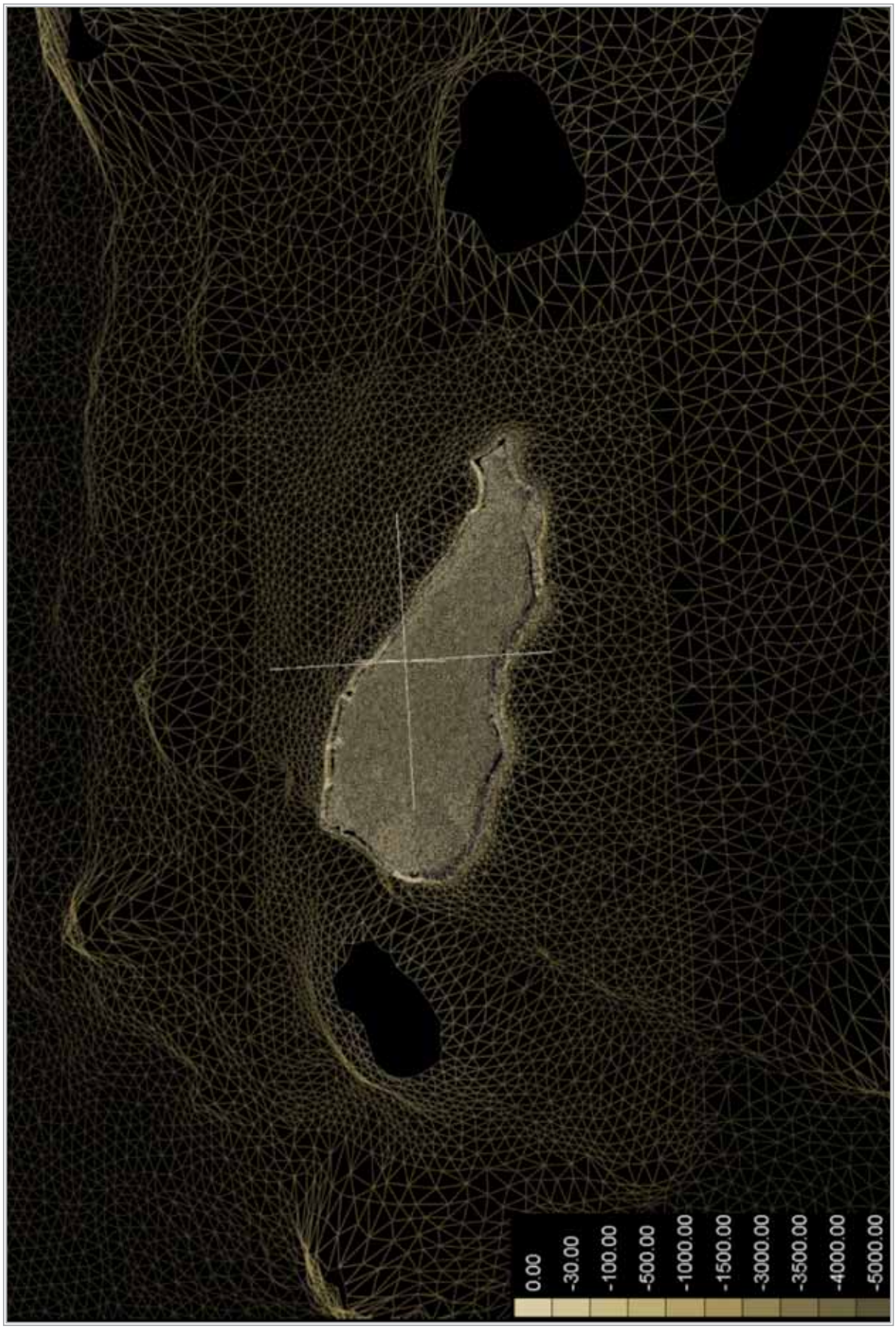


Figure 12 : Représentation tridimensionnelle d'une grille à maillage flexible axée sur Rangiroa, sur laquelle apparaît clairement la jonction avec le domaine-1. La profondeur n'est pas précisée.

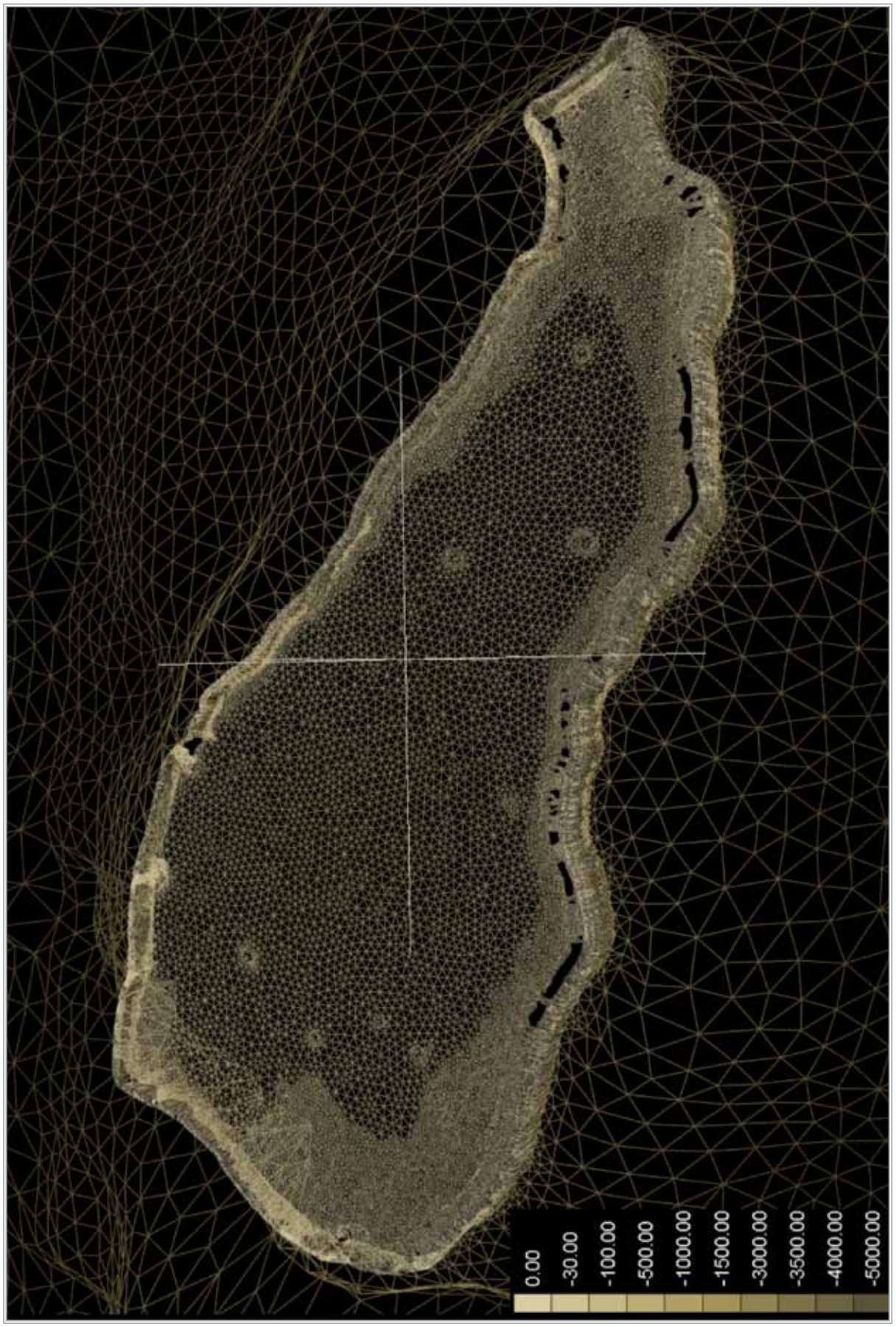


Figure 13 : Représentation tridimensionnelle d'une grille à maillage flexible axée sur Rangiroa. La profondeur n'est pas précisée.

4 CALIBRATION

4.1 Recueil de données océanographiques

Pendant six mois, une équipe composée d'agents de la Division SOPAC de la CPS et du gouvernement de la Polynésie française a conduit une campagne d'acquisition de données sur l'atoll de Rangiroa.

Durant la campagne, des données bathymétriques multifaisceaux (Figure 15) et des données océanographiques ont été recueillies (Figure 14). Des précisions sur les données collectées sont fournies dans les deux rapports complémentaires portant sur les levés bathymétriques multifaisceaux et sur l'acquisition des données.

Les données océanographiques recueillies ont servi à la calibration du modèle.

Figure 14 : Carte spatiale IKONOS 2002 de Rangiroa indiquant les sites de mouillage des instruments océanographiques. Se référer au rapport complémentaire pour obtenir des informations détaillées sur l'acquisition des données océanographiques.

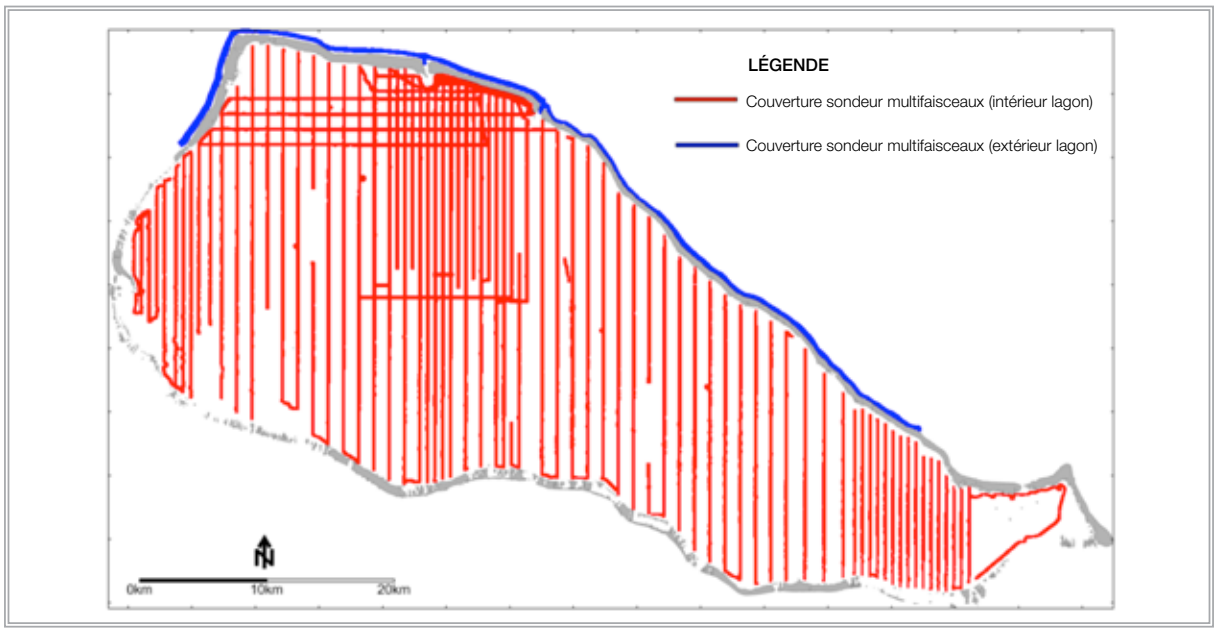


Figure 15 : Carte représentant la couverture des levés. Les traits rouges correspondent aux levés multifaisceaux dans le lagon. La ligne bleue représente les levés multifaisceaux effectués sur la pente récifale externe.

4.2 Observations relatives au paramétrage, à la calibration et à la sensibilité du modèle

Compte tenu du temps nécessaire pour exécuter un modèle couplé dans un domaine présentant plus de 100 000 éléments, il n'était pas envisageable d'adopter une procédure de calibration aussi complète que celle décrite dans le rapport technique complémentaire sur la modélisation par XBeach de l'impact de la houle.

Nous avons donc opté pour une approche plus pragmatique, fondée sur l'expérience et sur la littérature scientifique.

Pour ce qui est du module hydrodynamique, les forçages pris en compte dans le modèle sont les suivants :

- rugosité du fond ;
- forçage des vents ;
- forçage des vagues par le biais de la contrainte de radiation calculée dans le module d'analyse spectrale de la houle ;
- viscosité turbulente ;
- forçage de marée ;
- force de Coriolis.

Aux fins de la calibration, la rugosité du fond et la friction du vent ont été utilisées. Nous nous sommes servis de la viscosité turbulente déterminée grâce à la formulation de Smagorinsky, avec une valeur constante de 0,28 (valeur par défaut).

Les données enregistrées au moyen d'un capteur de pression sur la pente récifale ont été employées pour forcer les conditions de marée aux quatre limites.

Les vents extraits d'un modèle de vagues WaveWatch III de la Polynésie française (Ardhuin, IFREMER) ont servi de données d'entrée dans le modèle.

Le choix des formulations pouvant être utilisées dans un modèle spectral de vague est restreint.

Formulation spectrale

Les deux types de formulations spectrales ont été testés : la formulation entièrement spectrale et la formulation paramétrique à découplage directionnel. Bien que cette dernière requière des temps de calcul nettement plus réduits, elle ne répond pas aux besoins de la présente étude. En effet, elle ne permet de modéliser que de manière imprécise la transformation des vagues à une échelle assez large et/ou des applications pour lesquelles une mer formée (complètement développée) ne représente pas l'état dominant. C'est donc la formulation entièrement spectrale qui a été retenue, car elle simule de manière plus efficace la croissance, la décroissance et la transformation des vagues dues au vent, ce qui joue un rôle déterminant dans la modélisation de la houle cyclonique.

Formulation temporelle

Le module d'analyse spectrale de la houle élaboré par DHI comporte deux types de formulation temporelle : une formulation quasi stationnaire et une formulation instationnaire. La formulation quasi stationnaire nécessite en général des temps de calcul moins importants. Elle se limite néanmoins aux applications pour lesquelles le forçage évolue lentement dans le temps et dans l'espace, ce qui ne correspond pas vraiment aux caractéristiques d'une houle induite par des vents cycloniques. C'est pourquoi nous avons opté pour la formulation instationnaire.

La période de calibration a été choisie de manière à inclure un champ de houle du sud, pour lequel le phénomène d'ensachage est particulièrement marqué en raison de l'absence quasi totale d'îlots au niveau du récif.

Se concentrer sur un champ de vagues précis permet de réduire les temps de calcul, car on restreint la discrétisation directionnelle. Nous avons opté pour neuf faisceaux, avec une ouverture angulaire de 90° à 270°.

Puisque nous nous intéressons à la houle et aux vagues locales induites par le vent, la discrétisation spectrale a été définie sur 25 faisceaux présentant une fréquence minimale de 0,055 Hz et un facteur de fréquence de 1,1. Bien que les ondes infragravitaires revêtent une importance considérable dans la modélisation de la transformation des vagues sur des pentes récifales escarpées, des modèles comme MIKE21 et SWAN n'ont pas la capacité de prendre en compte ce paramètre.

Les conditions du niveau d'eau et des courants proviennent du modèle hydrodynamique et ont été actualisées en intégrant systématiquement à chaque étape la contrainte de radiation. Le niveau d'eau devrait selon toute vraisemblance jouer un rôle essentiel dans le modèle spectral de houle, car il modulera le phénomène d'ensachage sur l'ensemble du platier récifal sud.

Comme pour les transferts d'énergie non linéaires entre les différentes composantes d'onde, nous avons opté pour des interactions entre quadruplets de fréquences de vagues par la méthode DIA (Discrete Interaction Approximation). Bien qu'elle implique des temps de calcul importants, cette solution est communément adoptée lorsque l'on cherche à modéliser les caractéristiques essentielles d'un spectre de vagues en développement.

Nous avons en outre procédé à plusieurs essais infructueux associant des interactions entre triplets et quadruplets de fréquences de vagues.

Bien que des tests de sensibilité aient été réalisés pour les paramètres de dissipation par moutonnement et de forçage par le vent, nous avons avant tout ciblé la calibration du modèle spectral de vagues sur les paramètres de déferlement, gamma et alpha, et sur la rugosité du fond.

La fourchette de valeurs gamma habituellement utilisée, entre 0,5 et 1,4 environ, entraîne une trop forte dissipation. Comme suggéré dans le manuel d'utilisation élaboré par DHI, la fourchette en question peut être élargie jusqu'à 5. Pour ce qui est du paramètre de déferlement, les valeurs 0,5 / 0,7 / 1 / 2 et 5 ont été testées. C'est avec les valeurs hautes (gamma = 2 et gamma = 5) que les résultats rejoignent le mieux les données recueillies. Par ailleurs, la valeur de calibration employée pour alpha oscille entre 0,2 et 1,2.

En vue de tester la dissipation par frottement avec le fond, nous avons élaboré une carte du coefficient de rugosité de Nikuradse (Kn). Le coefficient Kn a été fixé à 0,04 au large et à 0,02 dans le lagon. Nous avons examiné l'effet de la variation de Kn sur la pente récifale et sur le platier récifal, en appliquant des valeurs allant de 0,04 à 1,6. Pour les valeurs hautes, la variation de Kn n'a eu qu'une incidence très limitée sur le modèle. Nous avons en outre testé directement la calibration, à l'aide d'un facteur de frottement, f_w, de valeur 0,2 et 0,5.

Enfin, en raison de la grande taille de l'atoll et de sa ceinture corallienne, seules des données éparses ont pu être collectées sur la crête récifale, à l'aide d'un système GPS-RTK. D'après les données recueillies, la hauteur de la crête est relativement constante, entre 0,1 m et 0,5 m, avec des valeurs centrées autour de 0,3 m. Une valeur constante a été attribuée au tombant sur toute la ceinture récifale de l'atoll.

Nous avons soumis le modèle à différentes hauteurs de crête (0,35 m, 0,15 m et 0,0 m). Les résultats montrent que le modèle est très sensible à la hauteur de la crête récifale.

Comme indiqué à la Figure 16, qui met en parallèle les données relatives à la vitesse de courant dans la passe de Tiputa, on obtient un résultat satisfaisant pour chaque hauteur de crête dans des conditions météorologiques normales (jusqu'au 25/08/2013, midi), même si, à certains endroits, la vitesse de courant maximale peut varier de manière sensible (< 0,4 m/s).

Le déferlement d'une forte houle de sud sur le récif au sud entraîne une hausse notable du niveau d'eau dans le lagon. En conséquence, un gradient d'élévation du plan d'eau (gradient hydrostatique) se crée du récif sud jusqu'à l'entrée de la passe de Tiputa. Sous l'effet de la gravité, le courant généré de haut (partie sud) en bas (entrée de la passe de Tiputa) du gradient peut soit renforcer l'écoulement de l'eau hors du lagon si la marée est descendante, soit entrer en opposition avec le courant de flot à l'intérieur de la passe.

La Figure 16 et la Figure 17 illustrent la compétition entre le courant de flot et le courant généré par le gradient d'élévation du plan d'eau. Au début de l'épisode de forte houle de sud (à partir du 25/08/2013, midi), la vitesse de courant maximale dans la passe de Tiputa s'accroît lorsque l'eau reflue du lagon, tandis que le courant de jusant (marée descendante) voit sa vitesse, et sa durée, se réduire progressivement au fur et à mesure que les vagues déferlant sur le récif sud grossissent.

Une hauteur récifale de 0,35 m n'engendre pas d'ensachage suffisamment important pour contrer de manière satisfaisante le courant de flot à l'embouchure de la passe de Tiputa. L'élévation de la surface libre étant sous-estimée (Figure 17), le courant induit par le gradient hydrostatique ne parvient pas à s'opposer au courant de flot (Figure 16).

Lorsque la crête récifale présente une hauteur de 0,0 m, l'ensachage est trop violent, ce qui fait que le niveau d'eau dans le lagon est trop élevé (Figure 17) et que le courant de flot disparaît à l'intérieur de la passe de Tiputa.

Avec une hauteur de 0,15 m, le modèle réussit à décrire avec précision l'équilibre entre les forçages à l'intérieur de la passe de Tiputa (vitesse de courant de flux et de reflux), et obtient des résultats qui rejoignent les données d'observation. Pour ce qui est du niveau d'eau à marée haute durant l'épisode de houle de sud, les données de sortie correspondent aux relevés effectués. En revanche, le niveau d'eau à marée basse est nettement inférieur (≈ 10 cm) à celui observé.

La mer se retire du lagon principalement à travers les passes d'Avatoru et de Tiputa. Dans la passe de Tiputa, les résultats de la simulation concordent avec la vitesse de courant. Comme le profileur mouillé dans la passe d'Avatoru a été dérobé, aucune vérification n'a été possible.

Le résultat le plus satisfaisant a été obtenu avec une valeur gamma haute (5,0), une valeur alpha basse (0,2) et une carte de rugosité de Nikuradse constante (0,04). À la Figure 16 et à la Figure 17, les données de sortie pour lesquelles le meilleur jeu de paramètres a été défini sont comparées aux données d'observation.

Les données correspondant au pic enregistré lors de l'épisode de houle de sud (Hs ≈ 4,0 m) du 27/08/2013 au 29/08/2013 ont ensuite été soumises dans le modèle calibré. Le test de validation a été concluant : le niveau d'eau dans le lagon et la vitesse dans la passe de Tiputa obtenus par simulation sont en effet similaires aux données d'observation, avec une hausse du niveau d'eau d'environ 0,8 cm et une vitesse de courant maximale de 4,0 m/s (Figure 18 et Figure 19).

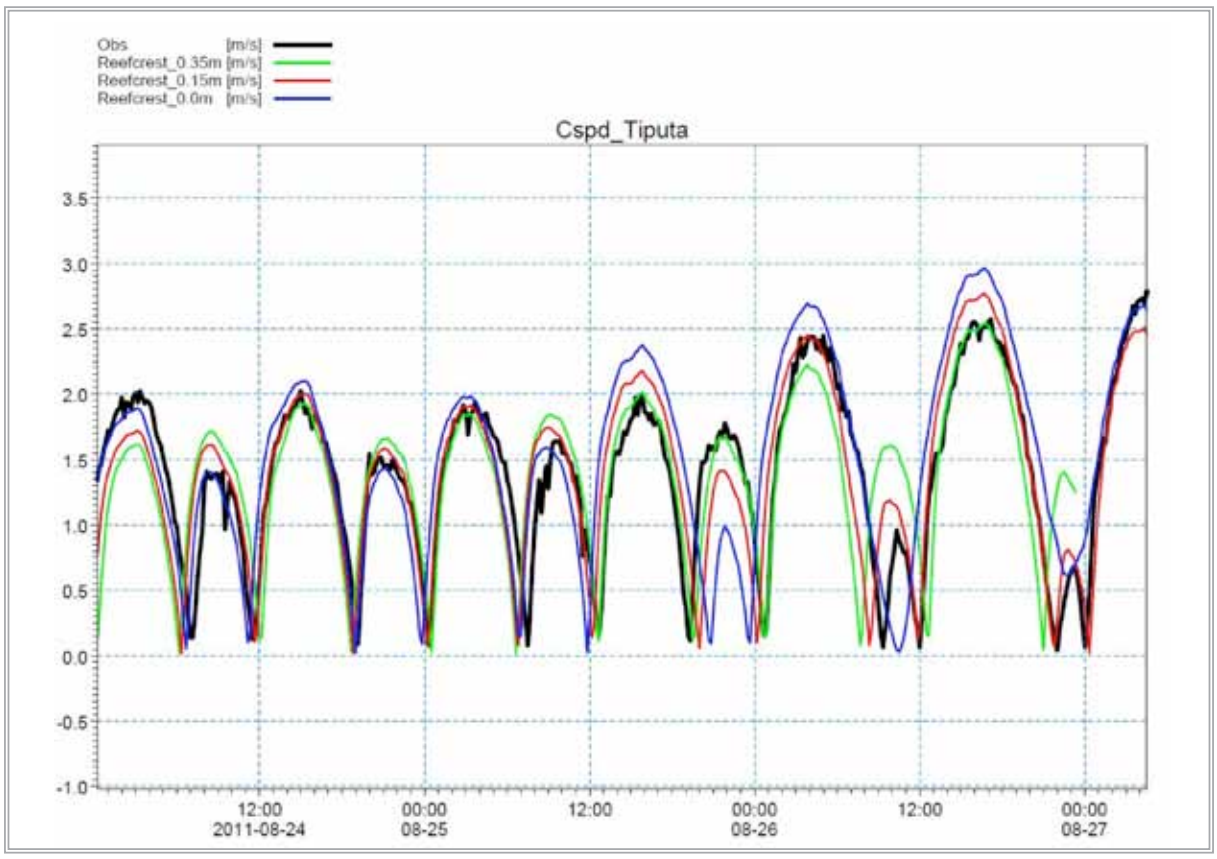


Figure 16 : Sensibilité de la hauteur de la crête récifale à la vitesse de courant dans la passe de Tiputa.

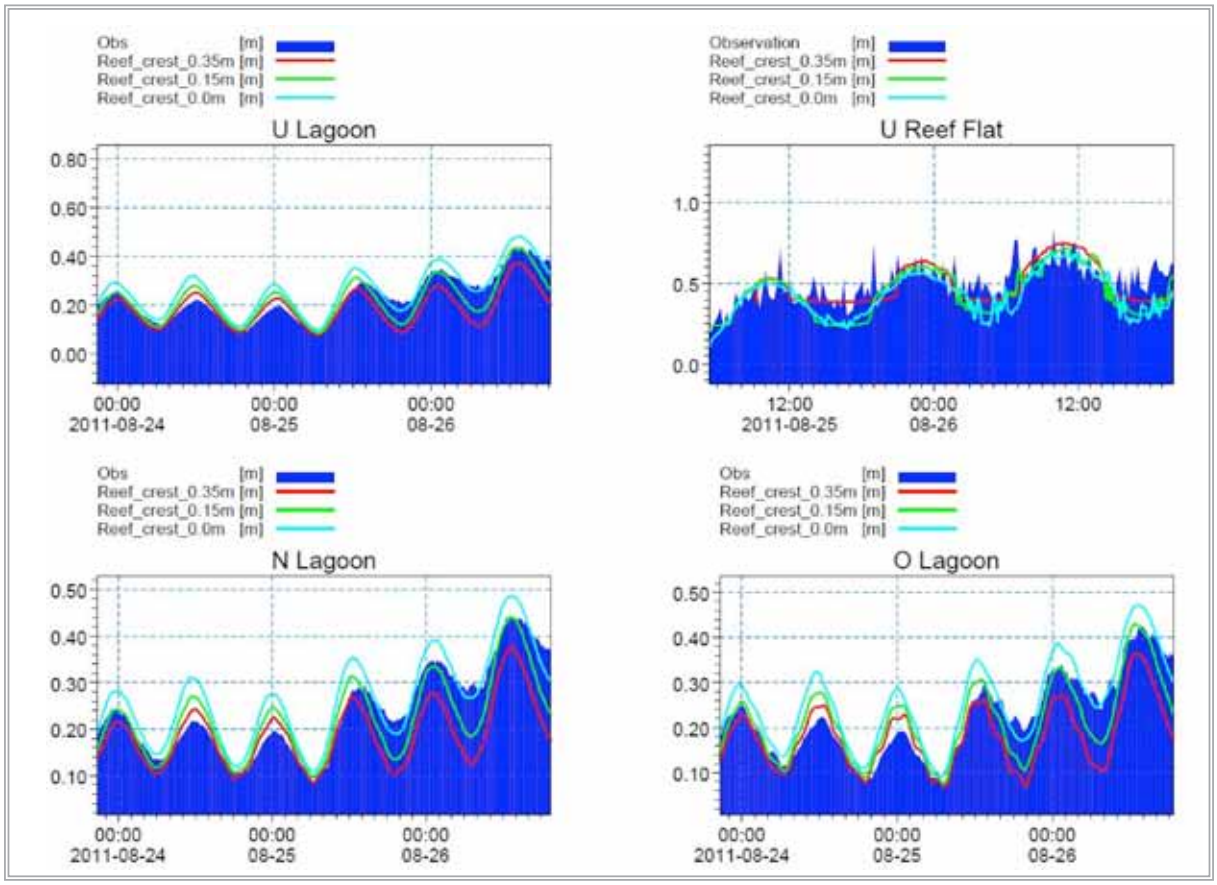


Figure 17 : Sensibilité de la hauteur de la crête récifale au niveau d'eau à quatre endroits du lagon. Dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du graphique en haut à gauche : lagon d'Utoto, platier récifal d'Utoto, lagon d'Otupipi, et lagon nord.

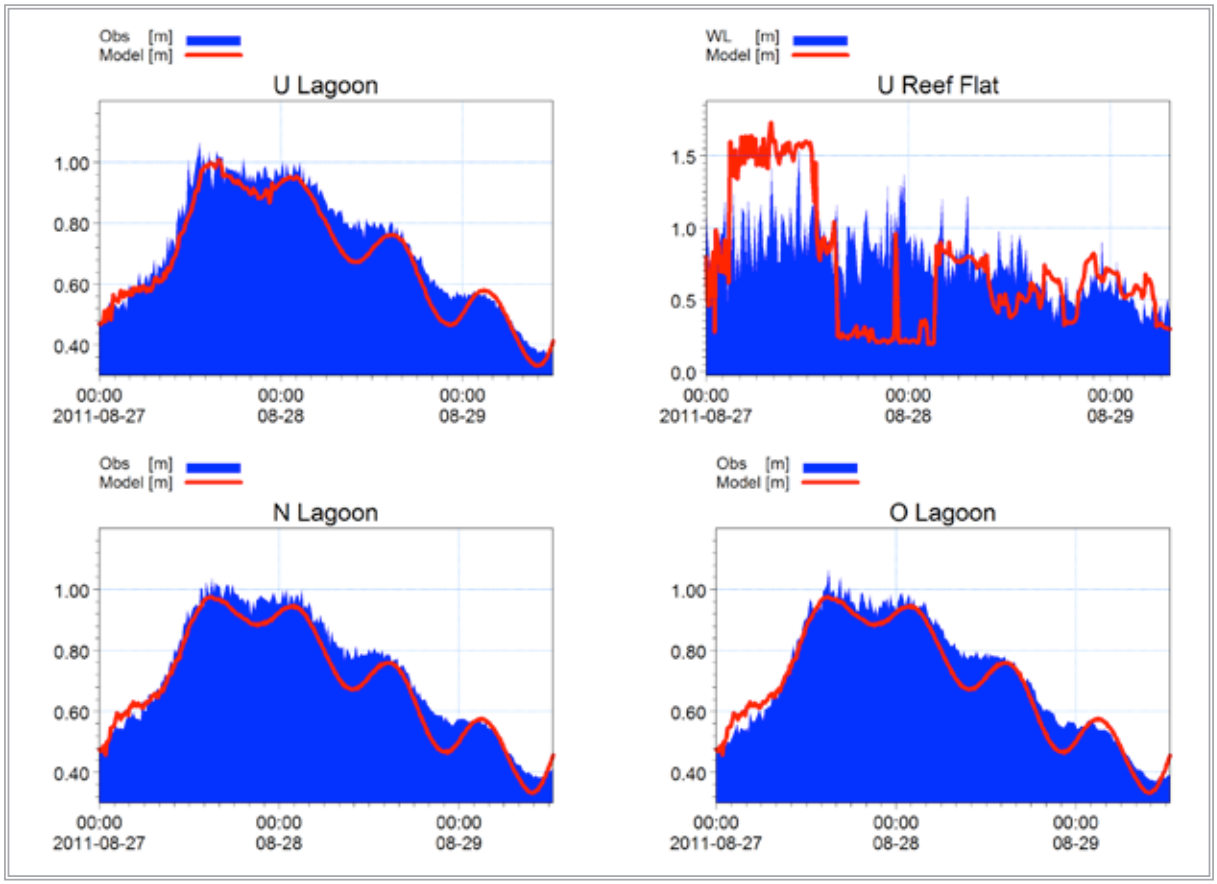


Figure 18 : Validation du modèle à l'aide du niveau d'eau observé dans le lagon durant l'épisode de houle de sud (Hs = 4,0 m). Dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du graphique en haut à gauche : lagon d'Utoto, platier récifal d'Utoto, lagon d'Otupipi, et lagon nord.

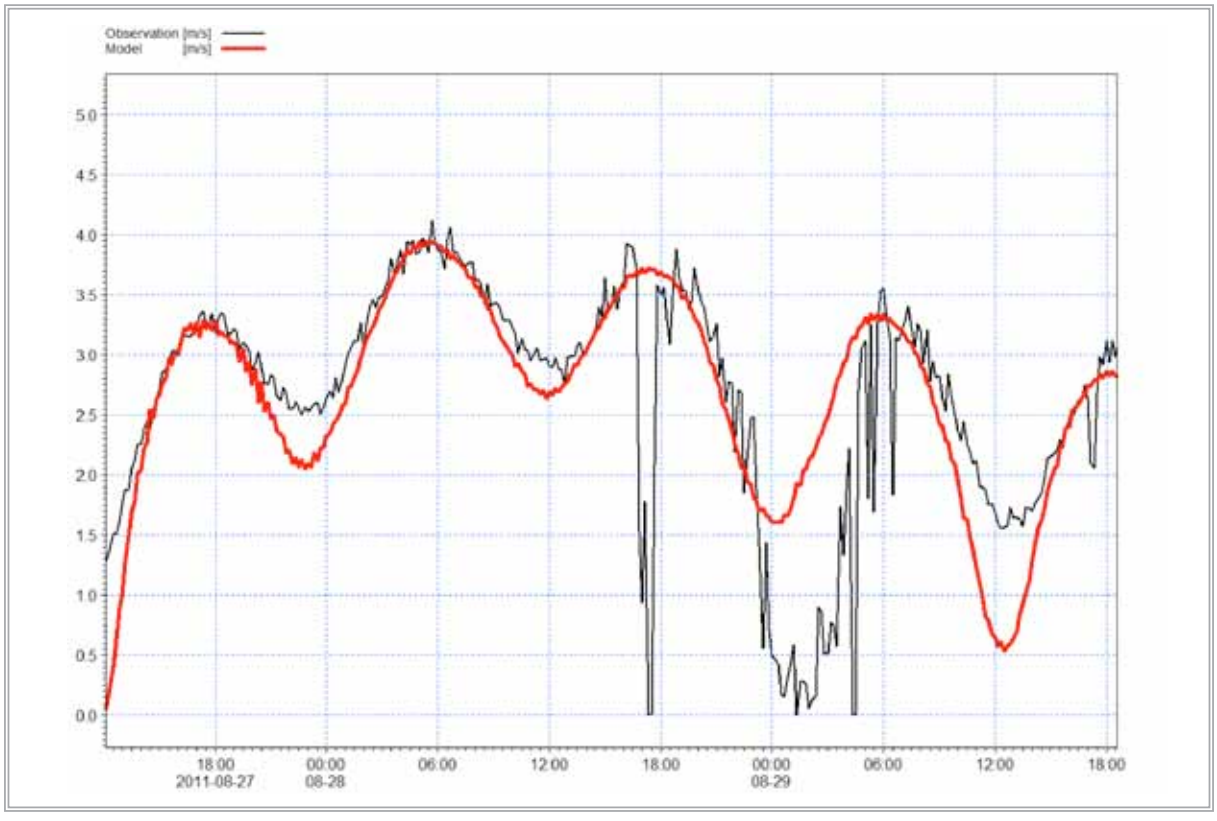


Figure 19 : Validation du modèle à l'aide de la vitesse de courant observée dans la passe de Tiputa durant l'épisode de houle de sud ($Hs \approx$ 4,0 m).

Les observations sont indiquées en noir, et les résultats du modèle en rouge. L'unité de mesure est le mètre par seconde.

5 APPLICATION : CYCLONE ORAMA-NISHA

Le jeu de paramètres calibré a été appliqué afin de modéliser le cyclone Orama-Nisha. Le domaine a été élargi de la manière détaillée au point 3.3. Aux limites, on a forcé les données de marée extraites de FES2012, un modèle de marée international récent. Les données tirées du modèle FES2012 coïncident avec les données recueillies par le capteur de pression sur la pente récifale en face d'Avatoru (Figure 20). Par ailleurs, la friction du vent, ou coefficient de traînée, a été affinée, de façon à tenir compte de la vitesse élevée des vents induits par le cyclone. Une hausse linéaire a été définie pour la friction du vent. Le coefficient de traînée augmente de manière linéaire, de 0,001255 à 0,002, pour des vents allant de 7 à 25 m/s.

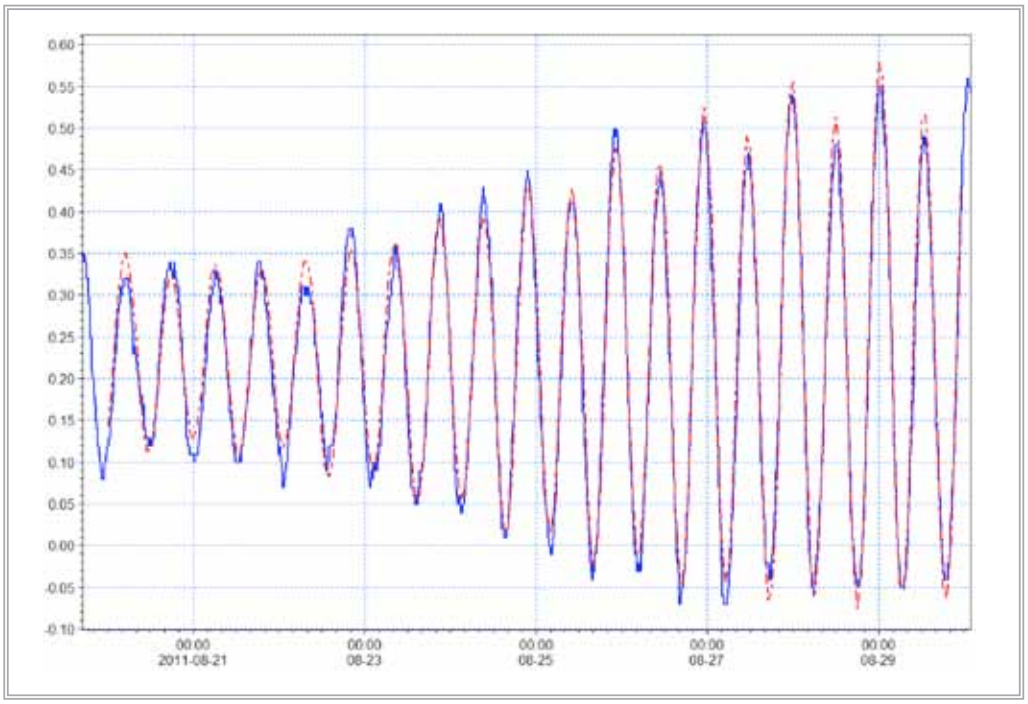


Figure 20 : Comparaison entre les données de marée observées à proximité d'Avatoru (en bleu) et les données de marée extraites du modèle FES2012 (en rouge). Hauteur en mètres.

5.1 Production de séries chronologiques bidimensionnelles du champ de vent et du champ de pression associés au cyclone Orama-Nisha

Les données relatives au cyclone proviennent de la base International Best Track Archive Stewardship (IBTrACS). Le champ de vent et de pression généré par le cyclone a été calculé à l'aide du modèle paramétrique de Young et Sobey (1981).

Le modèle paramétrique en question détermine le champ de pression et de vent cyclonique à partir de trois paramètres d'entrée : R_{mw}, le rayon de vent maximum ; V_{max}, la vitesse de vent maximale ;et P_c, la pression au centre du cyclone.

La base de données IBTrACS ne contient aucune information sur le rayon de vent maximum du cyclone Orama-Nisha. Nous avons donc utilisé une valeur classique, R_{mw} = 47 km , à chaque pas de temps. Les données de sortie obtenues sont traitées comme suit :

- Ajustement géostrophique - Le modèle paramétrique fournit des informations sur le vent dit géostrophique. Un ajustement est ensuite effectué afin de déterminer le vent à la surface de référence normalisée, conformément à Harper et al.
- Asymétrie due à la progression du cyclone - Il est tenu compte de l'asymétrie du vent induite par la progression du cyclone (Harper et al.). Le facteur d'ajustement Delta_fm est défini à 0,5, sa valeur par défaut. L'angle de vent maximal, Teta_max, est fixé à 115°, la valeur généralement utilisée dans l'hémisphère Sud.
- Angle associé aux vents entrants - Les frottements entre l'air et l'eau sont pris en compte, car ceux-ci entraînent une déviation du vent vers le centre du cyclone (Sobey et al.).

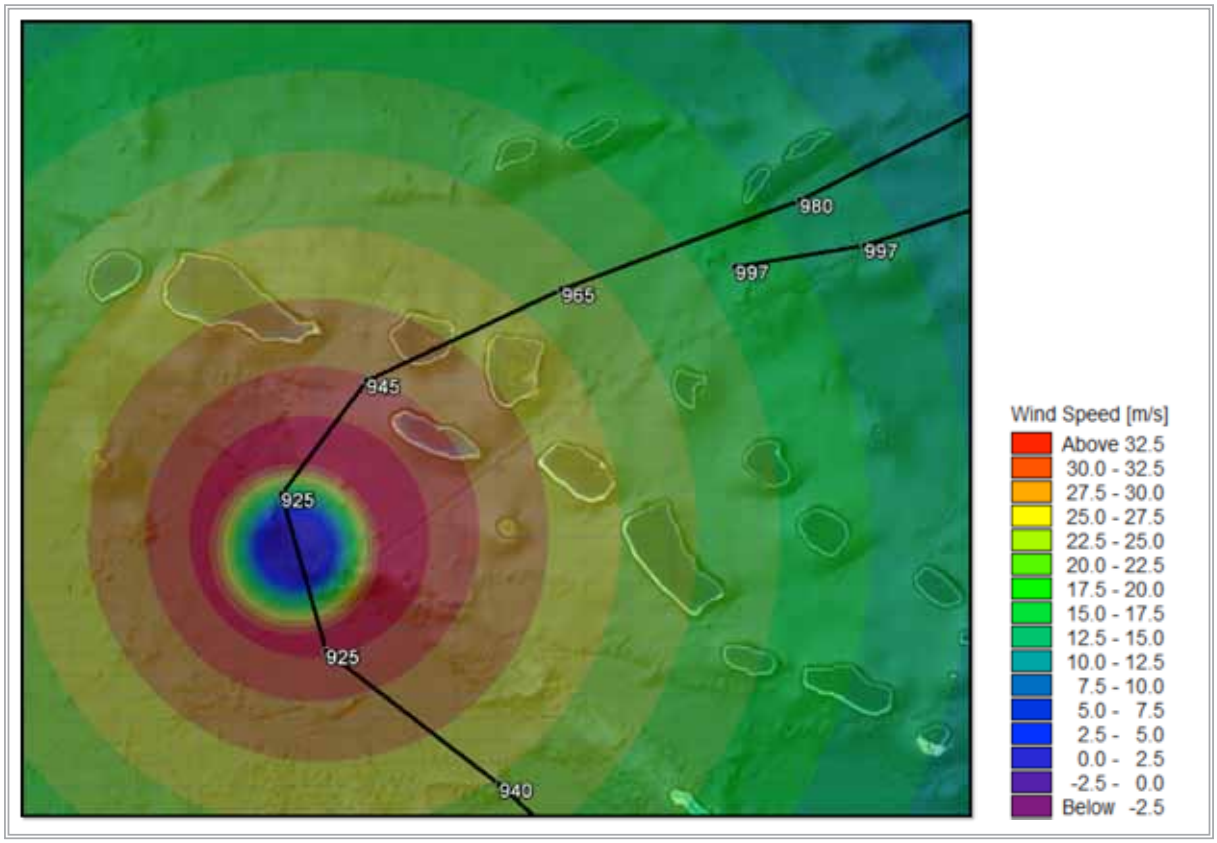


Figure 21 : Image Google Earth superposée sur un cliché représentant le champ de vent après ajustement et la trajectoire du cyclone Orama-Nisha (ligne noire, avec précision des valeurs de pression) provenant de la base de données IBTrACs.

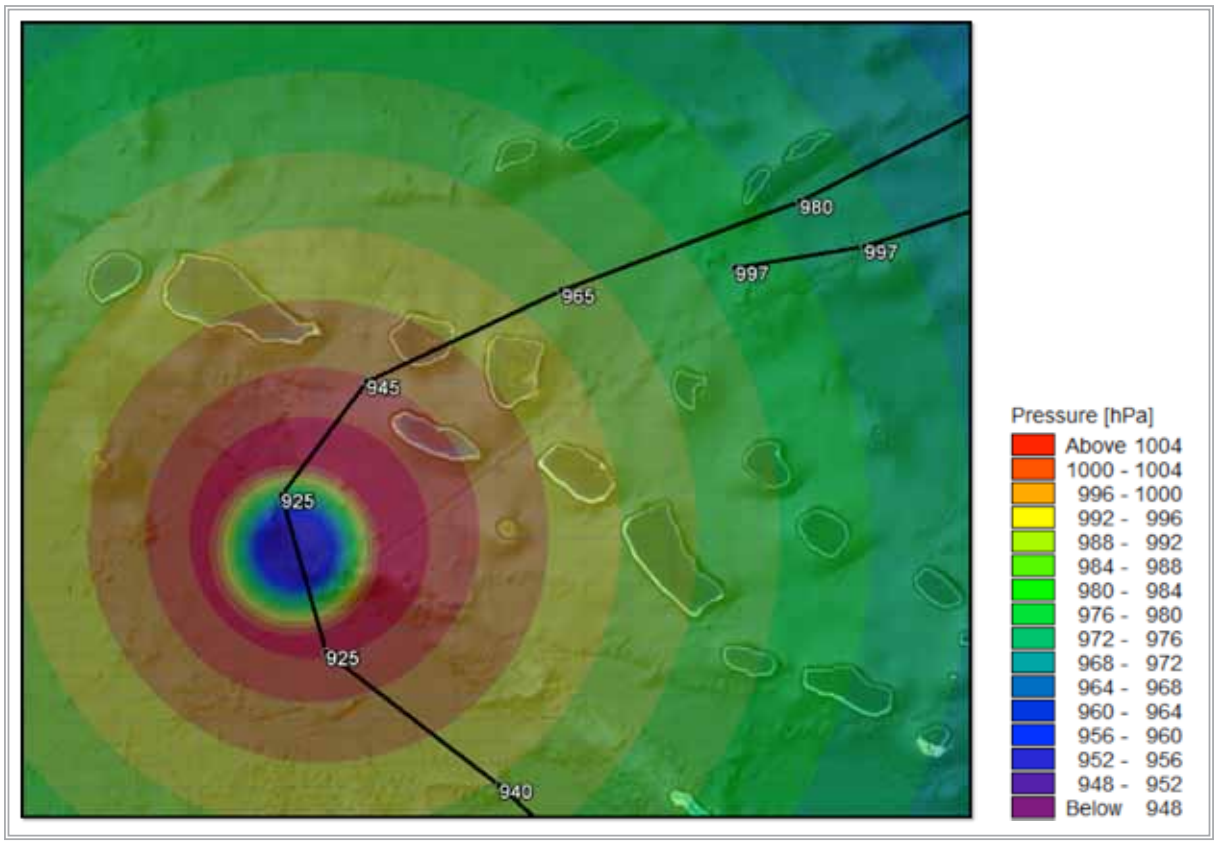


Figure 22 : Image Google Earth superposée sur un cliché représentant le champ de pression engendré par le cyclone Orama-Nisha et la trajectoire du cyclone (ligne noire, avec précision des valeurs de pression au centre) provenant de la base de données IBTrACS.

5.2 Résultats

Le modèle permet d'obtenir des informations sur l'incidence des forçages atmosphériques (vent et pression) engendrés par le cyclone Orama-Nisha sur les eaux du lagon et de l'océan.

Au fur et à mesure que le cyclone s'intensifie, la vitesse de rotation des vents s'accroît et donne lieu à de plus grandes vagues. D'après la simulation, les hauteurs de houle significatives maximales (Hs) générées face à Avatoru et au large du récif sud approchent respectivement 5,8 m et 9,0 m (Figure 23 et Figure 24). En raison de l'étendue de l'atoll de Rangiroa, la houle engendrée dans le lagon atteint une hauteur significative maximale de 6,0 m dans la partie orientale. En face d'Avatoru et de Tiputa, les hauteurs maximales calculées par le modèle s'élèvent à 3,5 m et 4,8 m respectivement.

De plus, le champ de houle modélisé indique qu'une vague de Hs = 12 m frappe l'atoll d'Anaa (Figure 27), ce qui correspond aux informations recueillies sur le cyclone (projet ARAI).

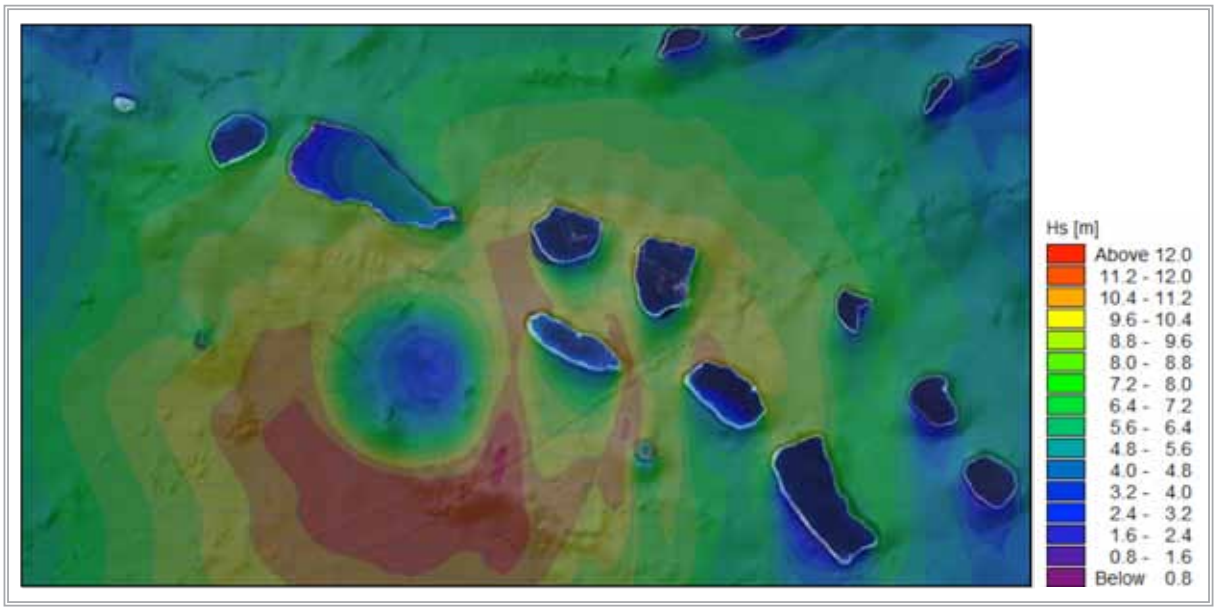


Figure 23 : Simulation du champ de houle (Hs) généré par le cyclone Orama-Nisha. L'image correspond au pas de temps présentant les hauteurs de houle significatives maximales aux alentours de Rangiroa.

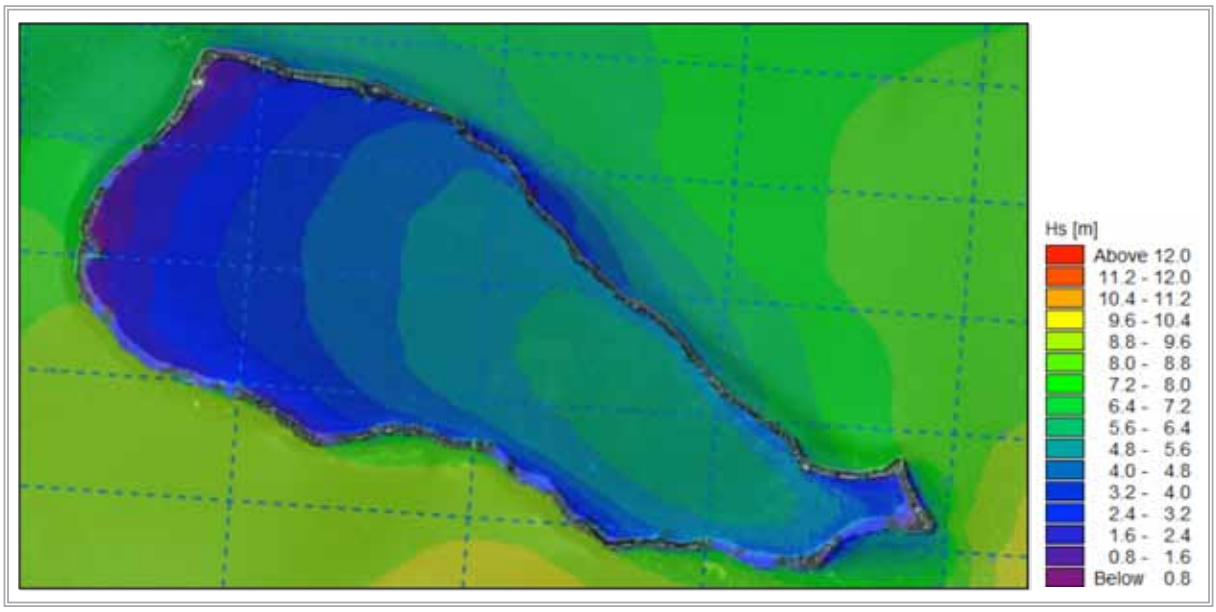


Figure 24 : Gros plan tiré de la simulation du champ de houle (Hs) généré par le cyclone Orama-Nisha.

Au pic du cyclone, l'hydrodynamique dans le lagon est influencée par plusieurs forces.

Provoqué par une houle de 9 m (hauteur significative) dans la zone du récif sud, l'ensachage entraîne une hausse rapide du niveau d'eau dans le lagon. La différence entre le niveau d'eau dans le lagon et l'océan est alors supérieure à 1,5 m (Figure 26). Ce gradient hydrostatique influe sur l'écoulement unidirectionnel sortant dans les deux passes. La vitesse de courant maximale simulée au centre de la passe de Tiputa s'élève à 6 m/s environ. Elle culmine à plus de 10 m/s à certains endroits plus proches du littoral.

La contrainte du vent crée une surcote importante dans le lagon, en direction de l'est (Figure 28). Au pic du cyclone, le modèle fait ainsi état d'un écart de 0,8 m entre le niveau d'eau dans la partie occidentale et la partie orientale du lagon.

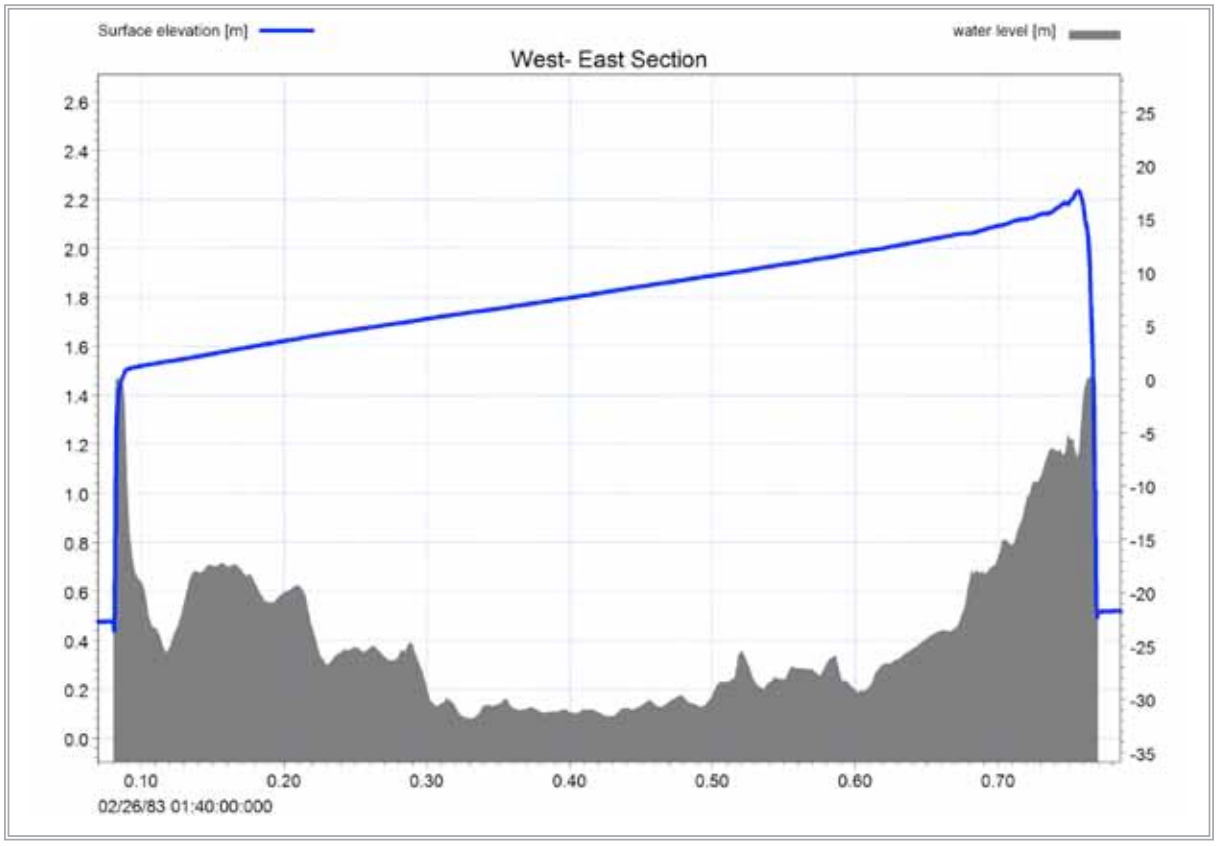


Figure 25 : Coupe transversale ouest-est du lagon de Rangiroa (zone grise) représentant la simulation du gradient d'élévation du plan d'eau induite par les vents (courbe bleue).

La vitesse de courant dans le lagon au pic du cyclone est illustrée à la Figure 29. Dans la partie occidentale, on observe un courant dominant en direction du nord dû à la contrainte de radiation sur le récif sud et au gradient d'élévation du plan d'eau. Le gradient hydrostatique, qui découle de la différence de niveau entre l'océan et le lagon, joue sur les flux dans la passe, avec un écoulement permanent hors du lagon, au pic du cyclone.

Le long du littoral sud et nord, où les eaux sont suffisamment peu profondes, la circulation est largement dominée par la contrainte du vent, ce qui génère un courant en direction de l'est. La surcote importante due aux vents qui poussent l'eau vers la partie orientale crée à son tour un gradient hydrostatique, tandis que la gravité engendre un courant en direction de l'ouest vers le milieu du lagon.

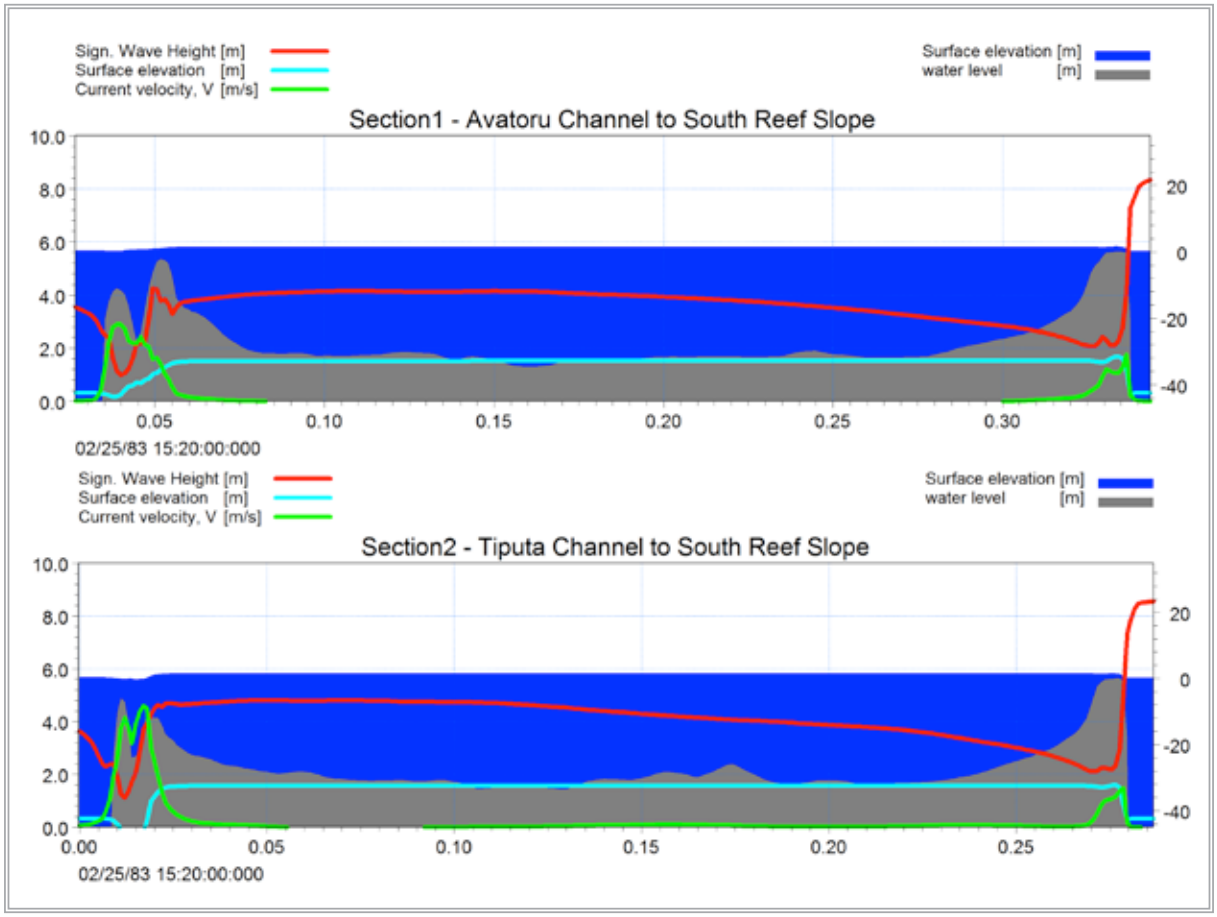


Figure 26 : Graphiques tirés de deux profils nord-sud extraits. La section 1 (en haut) représente la zone entre la passe d'Avatoru et la pente récifale sud. La section 2 (en bas) correspond à la zone entre la passe de Tiputa et la pente récifale sud. La légende est la suivante : fond du lagon et ceinture corallienne (zone grise) ; niveau d'eau (zone bleue) ; hauteur de houle significative (courbe rouge) ; élévation de la surface libre (courbe bleu clair) ; vitesse de courant (courbe verte).

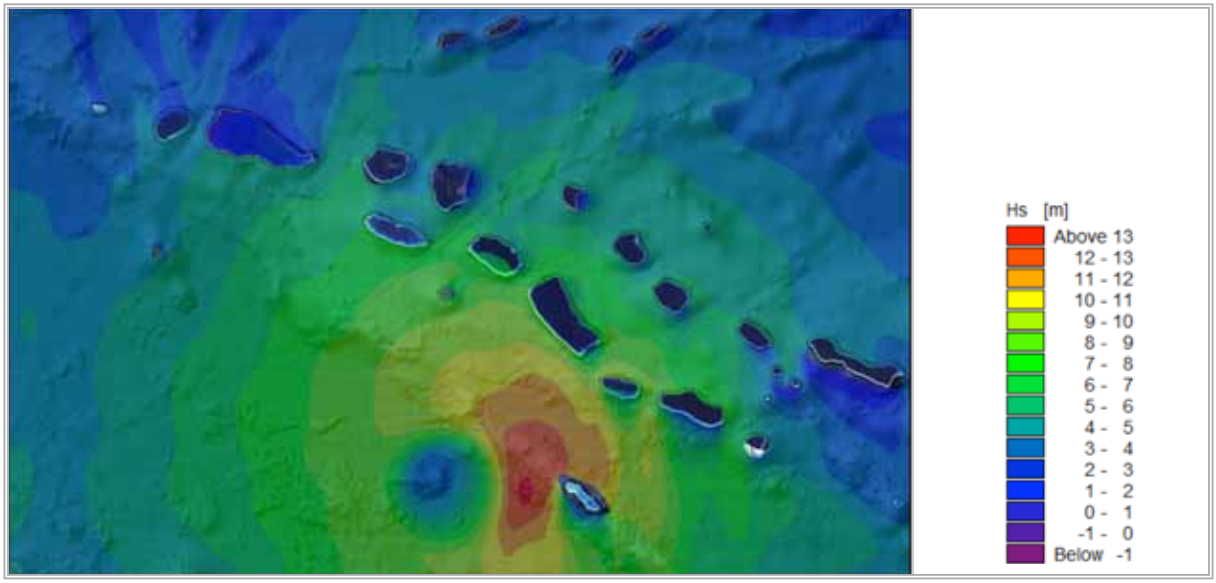


Figure 27 : Champ de houle durant le cyclone Orama-Nisha, générant une houle de 12 m (hauteur significative) juste à l'ouest de l'atoll d'Anaa.

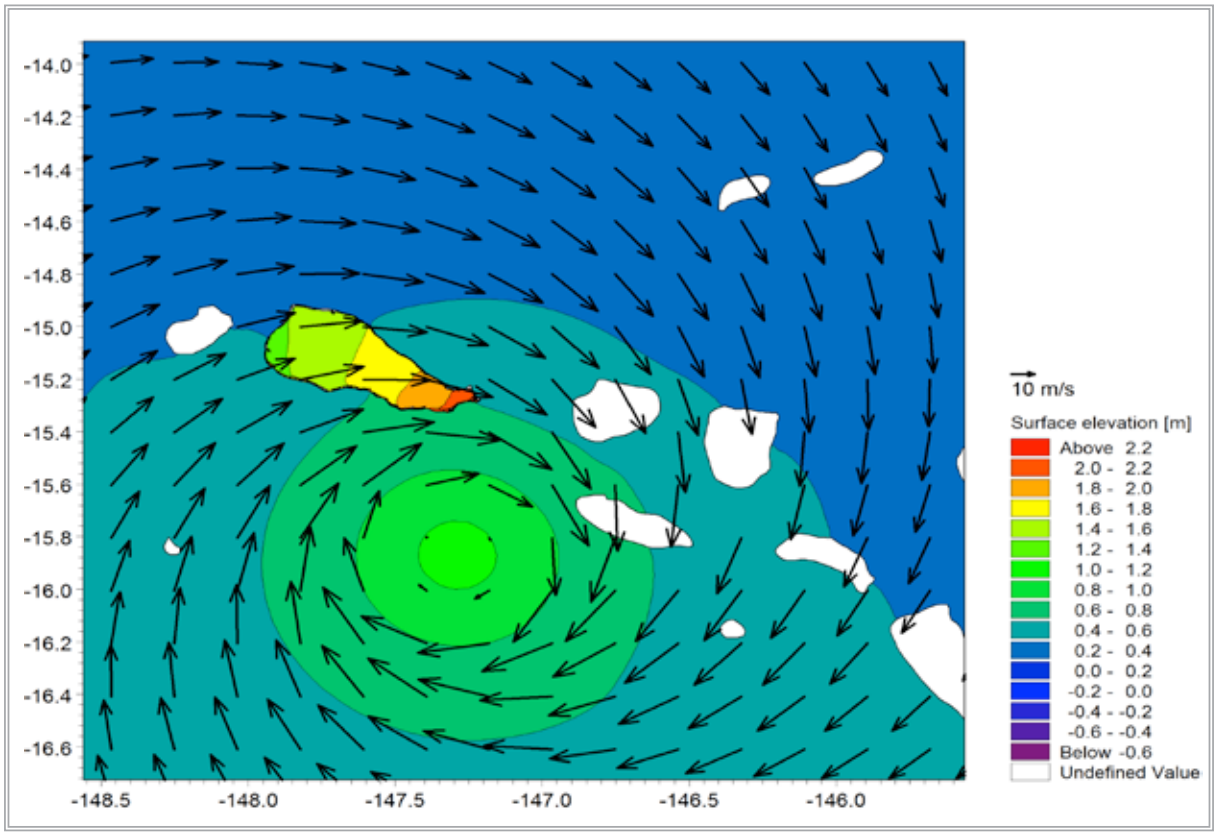


Figure 28 : Élévation de la surface libre générée par le cyclone Orama-Nisha. Les courbes de niveau illustrent les différents niveaux d'élévation, allant de 0,0 m à 2,2 m. Les vecteurs décrivent le champ de vent.

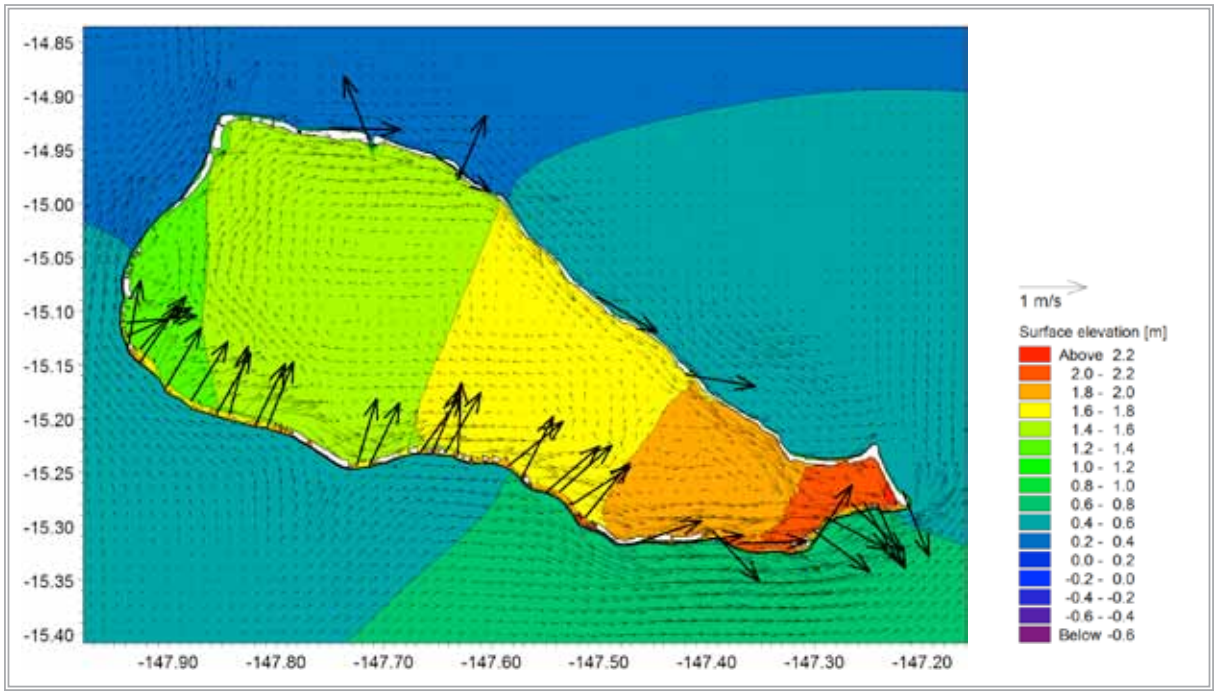


Figure 29 : Élévation de la surface libre générée par le cyclone Orama-Nisha. Les courbes de niveau illustrent les différents niveaux d'élévation, allant de 0,0 m à 2,2 m. Les vecteurs décrivent la vitesse et la direction des courants. Afin de faciliter la visualisation, la longueur des vecteurs est limitée à 1 m/s ; les vitesses supérieures à 1 m/s sont mises en évidence par des traits plus épais.

6 MODÉLISATION DES SUBMERSIONS MARINES DANS XBEACH

En vue d'étudier les submersions marines qui se produisent le long de la bande Avatoru-Tiputa, un modèle XBeach a été paramétré et forcé par les conditions de houle et de niveau d'eau extraites du modèle couplé, au pic du cyclone.

Les données issues du modèle couplé aux quatre coins du domaine XBeach sont indiquées à la Figure 30.

Sur la figure, on observe une forte variation de la hauteur de houle au niveau des limites au large et du lagon. En haut à gauche du domaine XBeach (coin nord-ouest), la houle du large atteint une hauteur significative de 5,7 m, tandis qu'à proximité de Tiputa (coin est), elle n'est que de 4,2 m à la même profondeur. Côté lagon, la hauteur de houle maximale (Hs max) oscille entre 3,7 m et 4,8 m, de l'ouest à l'est du domaine.

L'élévation de la surface libre varie de manière moins marquée le long des limites.

6.1 Paramétrage du modèle

En raison des temps de calcul importants nécessaires à l'exécution d'un modèle XBeach sur un domaine d'une telle grandeur, la simulation a été axée sur les conditions de houle et de niveau d'eau au pic du phénomène. Nous nous sommes penchés sur deux scénarios de houle : un champ de houle du large présentant une hauteur significative de 5,8 m et une direction moyenne de 295° ; et un champ de houle généré dans le lagon, présentant une hauteur significative de 4,8 m et une direction moyenne de 255°. Les conditions de houle susmentionnées ont été choisies par rapport au niveau d'eau maximal (Figure 30).

Une valeur constante a été attribuée au niveau d'eau dans le domaine : respectivement 1,6 m et 0,6 m de hauteur pour le forçage des vagues dans le lagon et le forçage des vagues au large. Un vent constant de 26 m/s assorti d'une direction de 258° est appliqué de façon uniforme dans le modèle.

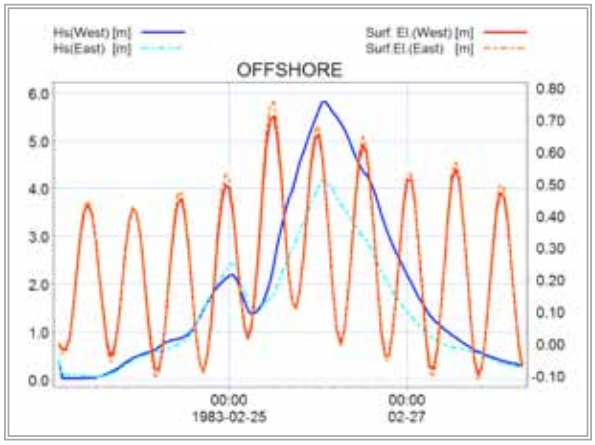
Le modèle simule les conditions de houle cyclonique sur une période d'une heure (hors phase de mise en train).

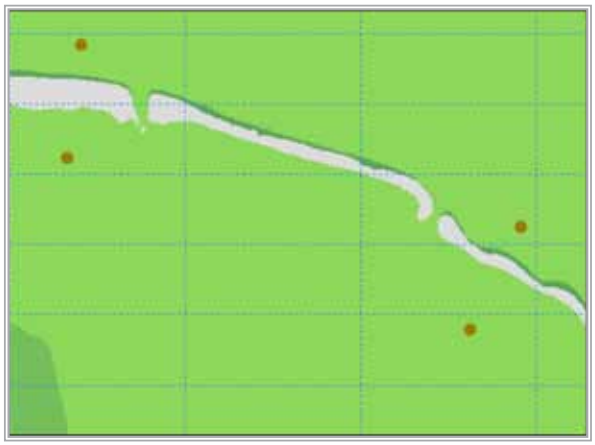
La calibration du modèle XBeach avait d'ores et déjà été réalisée dans le cadre du présent projet (description dans le rapport technique complémentaire sur les submersions côtières à Avatoru). Elle avait été effectuée sur un transect situé sur la façade océanique d'Avatoru. Le jeu de paramètres calibré a été utilisé pour modéliser les submersions engendrées par un champ de houle du large de 5,8 m de hauteur et par un champ de houle de 4,8 m généré côté lagon.

6.2 Résultats

Il ressort de la modélisation que la houle du large n'a pas provoqué de submersions marines durant le cyclone Orama-Nisha. En raison de l'utilisation d'un niveau d'eau constant dans le modèle XBeach, il n'a pas été possible de déterminer les courants sortants dans les passes. On estime toutefois qu'une interaction devrait se produire entre les courants et le champ de houle du large à proximité de l'entrée de la passe, si bien que les vagues se cambreraient et déferleraient, réduisant ainsi leur impact sur les côtes.

Les résultats sont très similaires pour le risque de submersion lié à une houle de 4,8 m et de 3,5 m dans le lagon (Figure 31 et Figure 32). Les submersions importantes sur le rivage du lagon sont principalement dues au niveau d'eau élevé dans le lagon engendré par l'onde de tempête et l'ensachage.





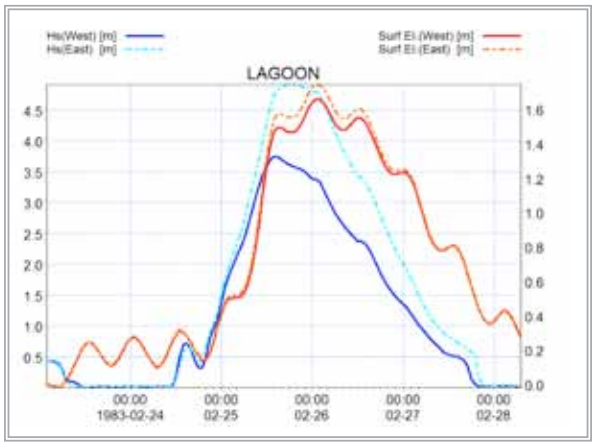


Figure 30 : Données relatives à la houle (Hs) et à l'élévation de la surface libre extraites du modèle de vague couplé. Les données sont extraites aux quatre coins du domaine XBeach (les sites d'extraction autour de l'îlot d'Avatoru sont indiqués sur l'image en haut à droite).

Le graphique en haut à gauche présente la hauteur de houle du large (Hs) et l'élévation de la surface libre au large. Le graphique en bas à gauche indique la hauteur de houle dans le lagon (Hs) et l'élévation du plan d'eau dans le lagon. Sur les deux graphiques, le point le plus à l'ouest est présenté sous la forme d'un trait continu, tandis que la série chronologique correspondant au point le plus à l'est est représentée par une ligne en pointillés.

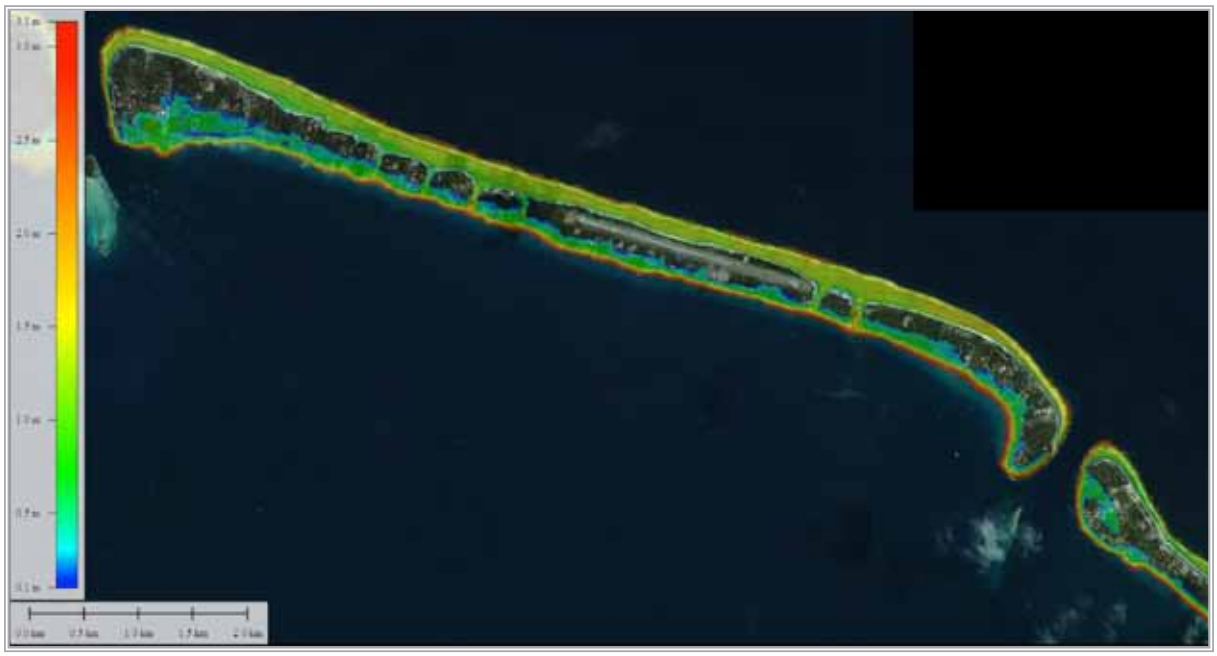


Figure 31 : Submersions marines engendrées par une houle simulée d'une hauteur de 4,8 m dans le lagon, de secteur sud-ouest (255°) et avec une surcote de 1,7 m . La carte indique la profondeur d'eau à tous les points de la grille où les terres présentent une altitude supérieure à - 1 m.

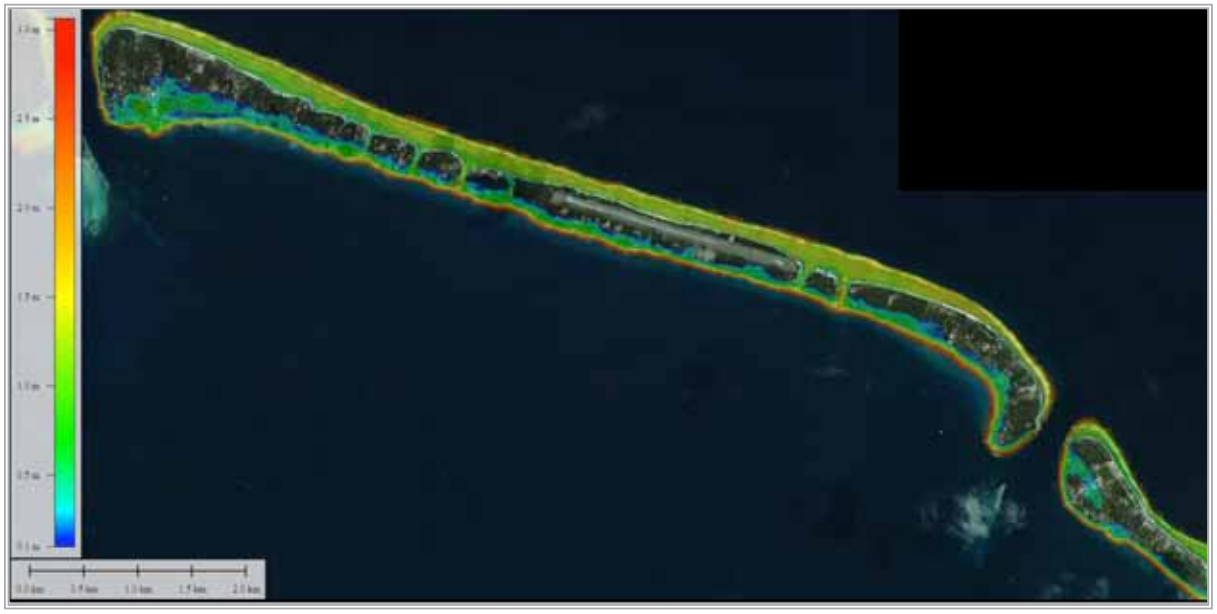


Figure 32 : Submersions marines engendrées par une houle simulée de 3,5 m dans le lagon, de secteur sud-ouest (255°) et avec une surcote de 1,7 m. La carte indique la profondeur d'eau à tous les points de la grille où les terres présentent une altitude supérieure à - 1 m.

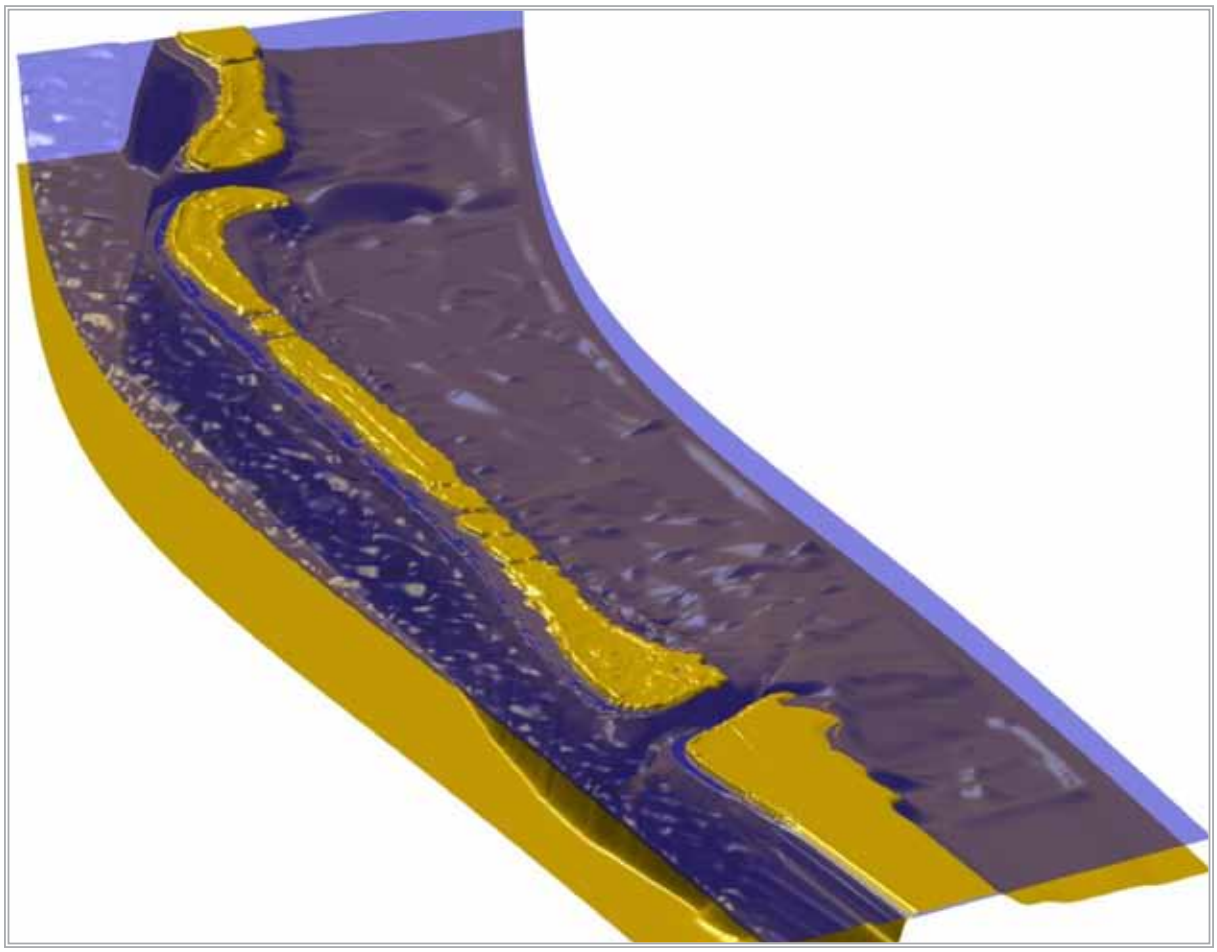


Figure 33 : Modélisation tridimensionnelle dans XBeach de l'impact d'un champ de houle du large de 5,8 m. Aucune submersion n'est constatée d'après la simulation. On a fait pivoter l'image (d'environ -90°), ce qui fait que la passe d'Avatoru apparaît en bas, la passe de Tiputa en haut, le lagon à droite et l'océan à gauche.

6.3 Résonance dans le lagon

Il existe deux types de résonance : les seiches dans un bassin fermé et les seiches dans un bassin semi-fermé, aussi appelées résonances portuaires.

Les seiches sont des ondes stationnaires de longue période dans un bassin fermé ou une partie isolée d'un bassin (Rabinovish,1993). Les périodes de résonance des seiches, aussi connues sous le nom de « périodes propres », sont fonction de la géométrie d'un bassin et de sa profondeur. Les forçages externes (vent, pression barométrique) influent toutefois de manière considérable sur l'amplitude d'une seiche. La résonance se produit lorsque les fréquences dominantes des forçages externes coïncident avec les fréquences propres du bassin.

Les résonances portuaires ou sèches côtières correspondent à un type particulier de mouvements de seiche survenant dans des bassins partiellement fermés. La plupart du temps, ces phénomènes sont provoqués par des ondes longues pénétrant par l'ouverture du bassin. Parmi les principales propriétés des résonances portuaires figure le fait que des mouvements verticaux même relativement restreints peuvent s'accompagner du déplacement de masses d'eau considérables à l'horizontale.

Le lagon d'un atoll, tel que celui de Rangiroa qui est entouré par une ceinture intertidale ne comportant que deux ouvertures étroites, peut présenter des caractéristiques similaires à celles d'un bassin fermé pour ce qui est de la formation de seiches.

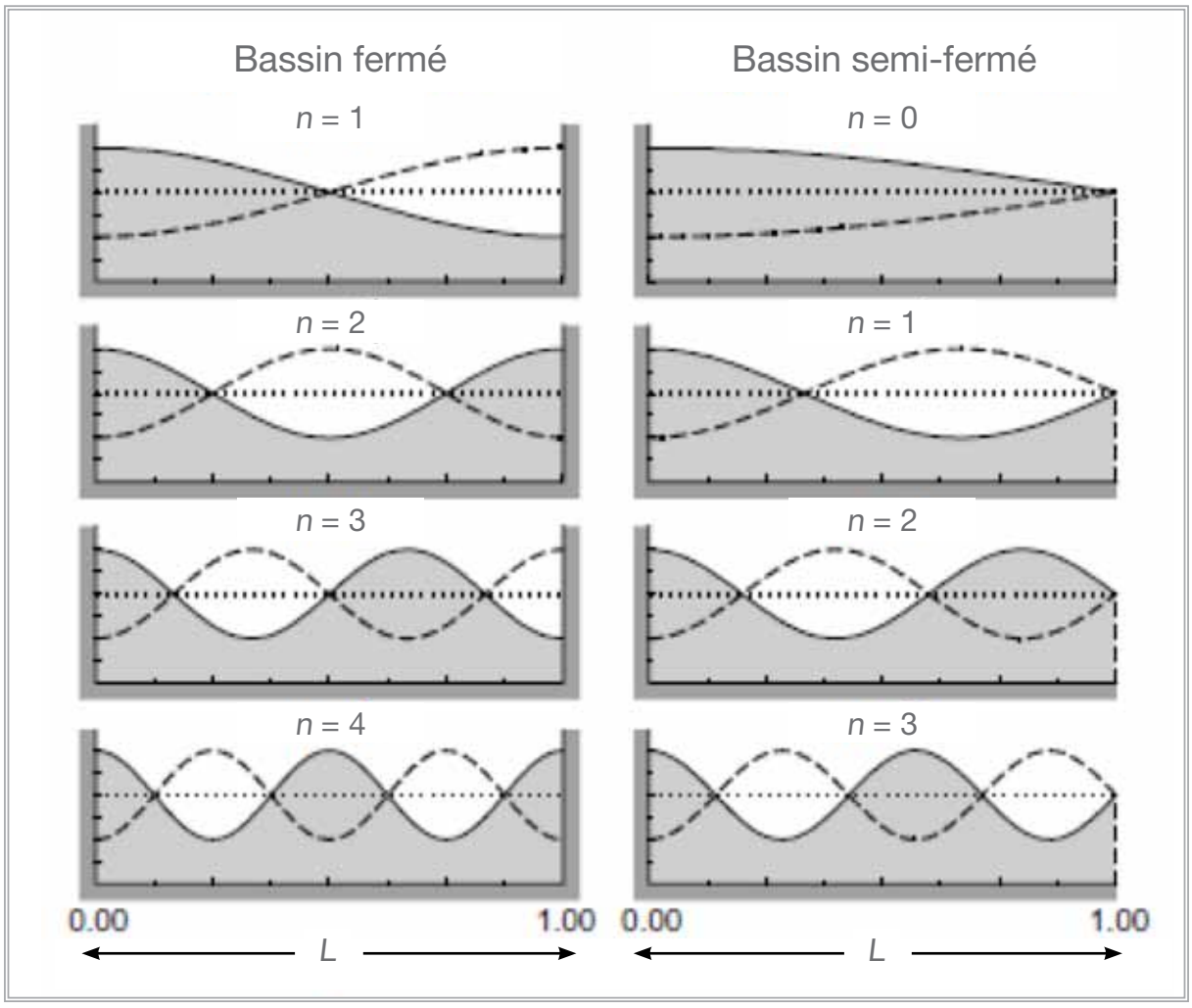


Figure 34 : Profil de la surface pour les quatre premières périodes de seiches dans un bassin rectangulaire fermé (à gauche) et semi-fermé (à droite) de même profondeur (Rabinovich, 2009).

Il ressort de la simulation réalisée pour le cyclone Orama-Nisha que les vents génèrent un fort gradient du niveau d'eau de l'ouest à l'est du lagon (Figure 28), d'une hauteur de 1,3 m à 2,1 m environ. Lorsque les vents mollissent, sous l'effet de la gravité, les eaux du lagon retrouvent leur équilibre hydrostatique, à savoir un plan d'eau horizontal. Sous l'action de la gravité, la masse d'eau oscillerait donc autour de son point d'équilibre hydrostatique jusqu'à ce qu'elle perde son énergie par dissipation. Ce phénomène est connu sous le nom de seiche uninodale (oscillation fondamentale) et se caractérise par la plus longue période de seiche possible. Si ce type de seiches se produisait dans le lagon de Rangiroa, le niveau d'eau serait alternativement haut et bas dans les parties occidentale et orientale du lagon.

Lorsque la masse d'eau se trouve dans un bassin rectangulaire fermé, la seiche peut être estimée à l'aide de la formule bien connue de Merian (Raichlen, 1966 ; Rabinovich,1993):

$$T_1 = \frac{2.L}{\sqrt{g.H}}$$,où L désigne la longueur du bassin et H sa profondeur.

Lorsque l'on a un profil bathymétrique parabolique, la période fondamentale de seiche devient :

$$T_1 = 1.110 \frac{2.L}{\sqrt{g.H}}$$

Dans le lagon de Rangiroa, où L = 80 km et H = 30 m, les valeurs approximatives de la période de seiche sont donc les suivantes : T = 2 h 35 (forme rectangulaire) et T = 2 h 52 (forme parabolique).

Le niveau d'eau des deux côtés du lagon (partie orientale et partie occidentale) a été extrait du modèle (Figure 30). D'après la simulation, aucune seiche n'a été générée à Rangiroa pendant le cyclone Orama-Nisha. Lorsque le cyclone a poursuivi sa progression plus au sud de l'atoll, la vitesse du vent a diminué de façon quasi linéaire de 26 m/s à 4 m/s en deux jours. Une seiche ne peut se produire quand s'applique un champ de vent s'atténuant de manière aussi progressive. Cette diminution linéaire peu marquée s'explique par la fixation d'une valeur constante de 47 km pour le rayon de vent maximum (R_{mw}), comme expliqué au point 5.

Des modifications ont été apportées au modèle afin de pouvoir étudier les effets potentiels d'une seiche dans le lagon, phénomène qui serait causé par une diminution brutale du forçage des vents. Le modèle est donc à présent uniquement forcé par la marée (exclusion du forçage des vents et des vagues). La valeur retenue pour l'élévation initiale du plan d'eau est prise vers le pic du cyclone, où l'on enregistre une importante surcote due aux vents dans la partie orientale (Figure 29).

Là encore, on a extrait du modèle les données relatives à l'élévation du plan d'eau pour les parties orientale et occidentale du lagon (Figure 36). Les données font clairement apparaître une oscillation verticale du niveau d'eau à tour de rôle entre les deux côtés du lagon. La période de cette oscillation est d'environ 2 h 40, ce qui coïncide avec la formule de Merian.

Par conséquent, bien que la simulation ne fasse état d'aucun phénomène de seiche durant le cyclone Orama-Nisha, avec un rayon de vent maximum (Rmw) précis entraînant une diminution brutale du forçage des vents, une seiche pourrait selon toute probabilité se produire dans le lagon. Toutefois, l'amplitude de l'oscillation serait relativement faible et décroîtrait rapidement, principalement en raison des ouvertures dans le lagon, sur le récif ou via les passes.

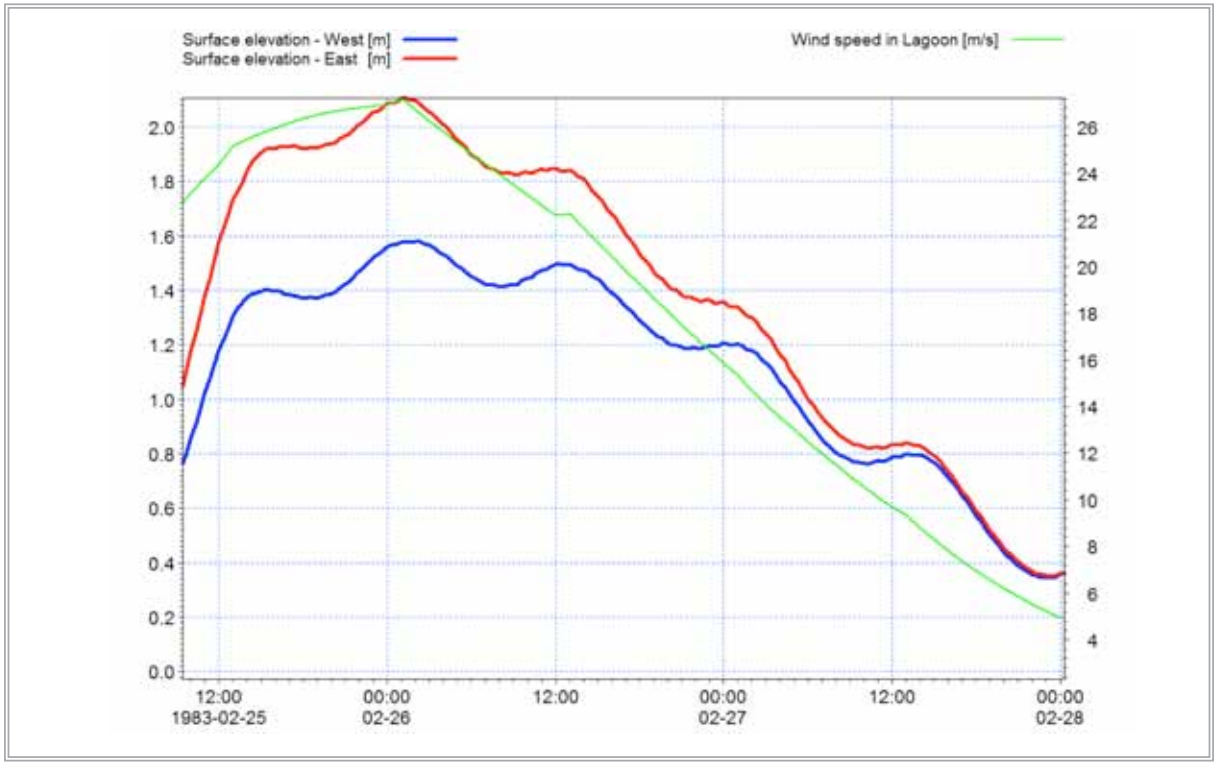


Figure 35 : Série chronologique de l'élévation du plan d'eau dans les parties orientale (en rouge) et occidentale (en bleu) du lagon de Rangiroa (données extraites du modèle). La vitesse du vent dans le centre du lagon est indiquée en ordonnée à droite (courbe verte).

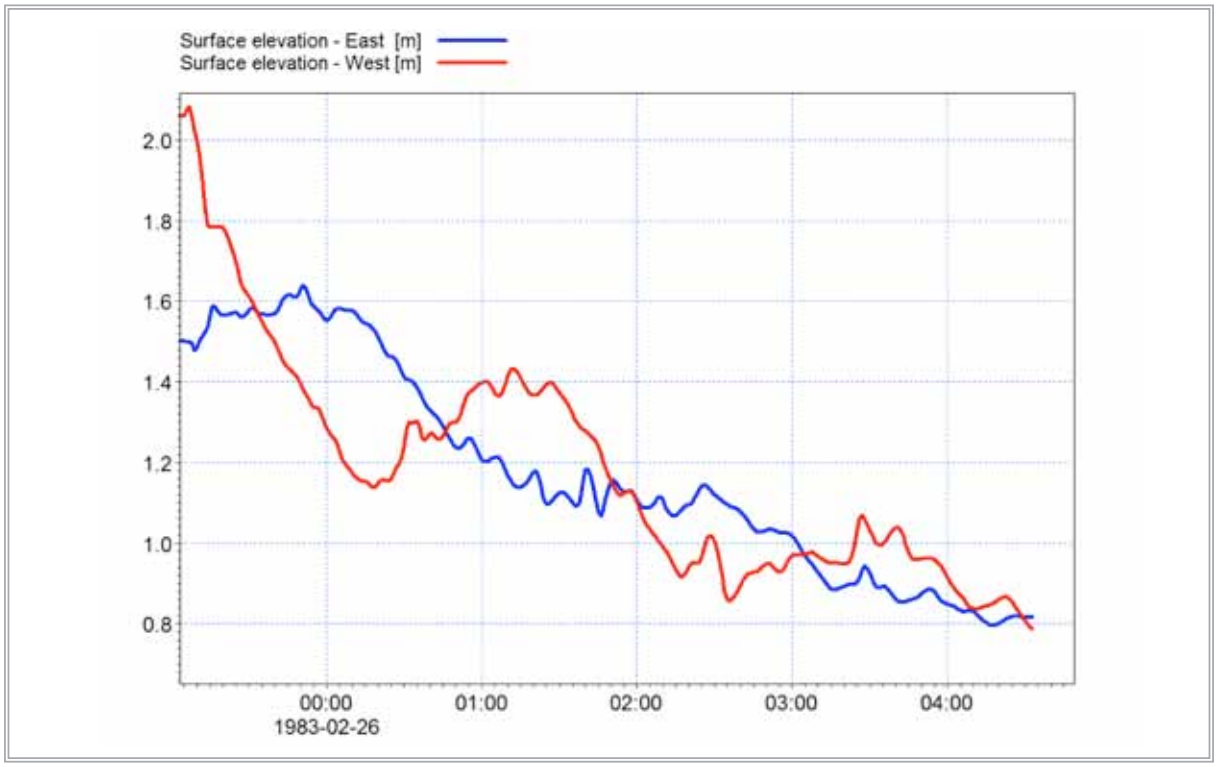


Figure 36 : Élévation du plan d'eau dans les parties orientale (en rouge) et occidentale (en bleu) du lagon de Rangiroa ; données extraites d'une simulation ne tenant pas compte du forçage des vents et des vagues. L'élévation initiale du plan d'eau retenue dans la présente simulation a été extraite de la modélisation HD du cyclone Orama-Nisha.

D'après les observations sur le terrain et les simulations, le déferlement d'ondes courtes sur une pente récifale escarpée engendre des ondes longues infragravitaires (Pomeroy et al.) sur le platier récifal. Les ondes infragravitaires en question, générées par le mécanisme de forçage au point de déferlement (Simmons), se dissipent pour la plupart une fois qu'elles se propagent sur le platier récifal en raison du frottement avec le fond, à un rythme toutefois inférieur aux ondes courtes. Les études ont donc conclu à la dominance des ondes infragravitaires dans le lagon en arrière du récif.

Lors du cyclone Orama-Nisha, de grandes vagues ont déferlé sur la pente récifale sud. Compte tenu de la surcote provoquée par les vagues et la marée de tempête, le niveau d'eau sur le platier récifal était élevé (> 2 m), ce qui a dû limiter la dissipation des ondes infragravitaires par frottement avec le fond. Par conséquent, des ondes de basse fréquence ont certainement pénétré dans le lagon et se sont déplacées en direction du nord, vers Avatoru/Tiputa.

En termes d'oscillations, le lagon de Rangiroa pourrait donc présenter des caractéristiques similaires à celles d'un bassin semi-fermé si des ondes longues (infragravitaires) s'introduisaient dans le lagon depuis le récif sud. Pour un bassin rectangulaire semi-fermé, les périodes d'oscillation sont calculées de la manière suivante :

$$T_n = 2.\frac{L}{(2n+1).\sqrt{gH}}$$

Pour le lagon de Rangiroa, qui possède une longueur transversale d'environ 30 km à proximité d'Avatoru/Tiputa ainsi qu'une profondeur d'à peu près 30 m, la période des oscillations libres est :

T_0 = 58 min ; T_1 = 19 min; ….,T_7 = 3.8 min ; T_{10} = 2.7 min …

La période des ondes infragravitaires serait de 25 s à 250 s. À partir du mode 7, la période d'oscillation libre correspond à la gamme de fréquences des ondes infragravitaires. En théorie, une résonance pourrait donc se produire suite au déferlement d'ondes courtes sur la pente récifale sud, qui entraînerait la propagation d'ondes infragravitaires dans le lagon.

7 CONCLUSION

Dans le cadre de la présente étude de modélisation, nous nous sommes appuyés sur les données topographiques et bathymétriques recueillies par GéoPolynésie, ainsi que sur les données océanographiques rassemblées à Rangiroa par la Division SOPAC de la CPS en collaboration avec le gouvernement de la Polynésie française.

Un modèle bidimensionnel MIKE21 de Rangiroa, associant les courants et les vagues, a été calibré. Le champ de vent et de pression associé au cyclone Orama-Nisha a été généré à l'aide du modèle paramétrique de Young et Sobey. Nous avons alors forcé dans le modèle couplé MIKE 21 les conditions météorologiques du cyclone, afin d'analyser les états de mer induits par le phénomène.

La simulation indique une houle cyclonique de hauteur significative de 9,0 m au sud de Rangiroa et de 5,8 m au nord de l'atoll. Côté océan, le niveau d'eau sur le littoral de la bande Avatoru-Tiputa a atteint une hauteur maximale d'environ 0,7 m. Dans le lagon, sous l'effet combiné de l'ensachage, de la pression et de la marée, le niveau d'eau a considérablement augmenté. Au pic du cyclone, les vents soufflaient à plus de 26 m/s au-dessus du lagon, en direction de l'est, ce qui a entraîné un fort gradient du niveau d'eau, la différence de hauteur étant d'environ 0,8 m entre la partie occidentale et la partie orientale.

Le modèle ne fait apparaître aucune seiche dans le lagon. Néanmoins, on ignore toujours si un tel phénomène a pu se produire durant le cyclone. En effet, le paramètre « rayon de vent maximum » n'était pas précisé dans les données relatives au cyclone Orama-Nisha extraites de la base IBTrACS. Une valeur constante a donc été utilisée, ce qui a donné comme résultat un forçage des vents déclinant de façon peu marquée et quasi linéaire sur la zone lagonaire. Un test réalisé a permis de montrer qu'en cas de diminution brutale du forçage des vents, un phénomène de seiche aurait pu se déclencher. La seiche en question aurait été engendrée par le gradient d'élévation du plan d'eau entre les parties occidentale et orientale du lagon.

Pour finir, un modèle XBeach portant sur la bande Avatoru-Tiputa a été paramétré, afin de reproduire les submersions marines survenues lors du cyclone Orama-Nisha. D'après la simulation, les conditions de houle du large n'ont pas engendré de submersion. En revanche, à l'intérieur du lagon, le niveau d'eau s'est élevé, principalement en raison de l'ensachage provoqué par les conditions au large, ce qui a entraîné d'importantes submersions.

8 SOURCES

Modèle de marée international FES2012
(http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes2004-fes99/description-fes2012.html)

Base de données IBTrACS
http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ibtracs

Modèle de vagues WaveWatch III relatif à la Polynésie française (Ardhuin, IFREMER)
ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wavewatch3/HINDCAST/

9 ANNEXES

Annexe A Bathymétrie dérivée de l'image satellite THEOS

Dans le cadre du projet, une campagne d'acquisition des données bathymétriques a été organisée pendant six mois dans le lagon de Rangiroa. En vue d'établir un modèle bathymétrique réaliste du lagon, des données complémentaires étaient cependant requises, soit pour les endroits auxquels le bateau sur lequel était installé l'échosondeur multifaisceaux n'a pas pu accéder, soit tout simplement pour les zones où les levés n'ont pas pu être réalisés en raison des conditions météorologiques.

En vue de combler les lacunes dans le jeu de données bathymétriques, l'équipe a fait l'acquisition d'une image satellite enregistrée par THEOS (Figure 37) et s'est employée à en extraire la bathymétrie des eaux peu profondes.

Figure 37 : Image satellite de Rangiroa enregistrée par THEOS

L'image a été traitée de manière à transformer en valeurs de réflectance les valeurs associées à chaque pixel de chaque bande. Les réflectances ont ensuite servi de données d'entrée dans un réseau de neurones artificiels (RNA), de la manière indiquée à la Figure 38.

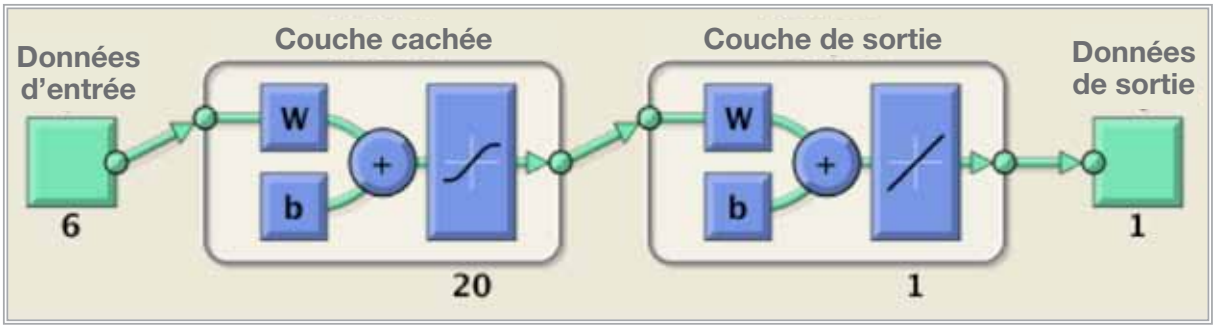


Figure 38 : Réseau de neurones artificiels éprouvé qui a été utilisé au cours de l'extraction des données bathymétriques. De gauche à droite : input (données d'entrée) ; hidden (couche cachée) ; output (couche de sortie) ; et output (données de sortie).

Le RNA a été éprouvé et validé à l'aide d'un échantillon de données monofaisceaux et multifaisceaux recueillies dans le lagon en face de la bande Avatoru-Tiputa. De nombreux jeux différents ont été testés, en faisant varier le nombre de couches cachées, l'importance relative et les biais. Par ailleurs, des données de sortie d'une qualité légèrement supérieure ont été obtenues en intégrant, outre la réflectance des trois bandes spectrales (verte, bleue et rouge), la valeur de leurs pixels.

Le meilleur réseau a alors été appliqué au reste des données recueillies face à la bande Avatoru-Tiputa. La régression linéaire entre les données collectées et les données de sortie du RNA donne un résultat de 0,93 (Figure 39).

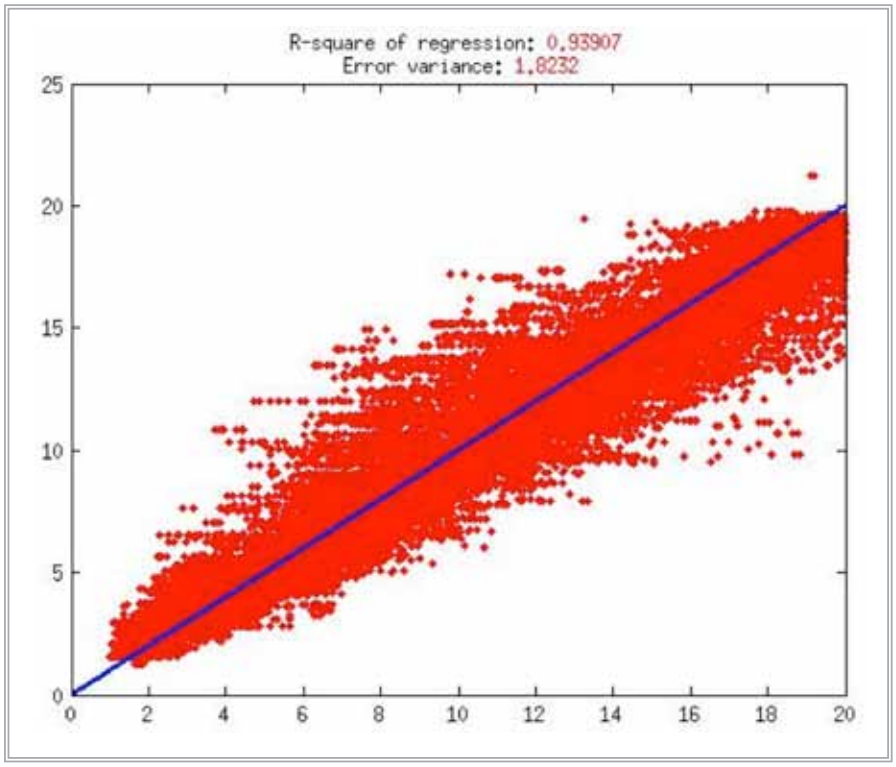


Figure 39 : Régression linéaire entre les données recueillies face à la bande Avatoru-Tiputa et la profondeur prédite tirée du RNA. Le trait bleu est la correspondance biunivoque parfaite.

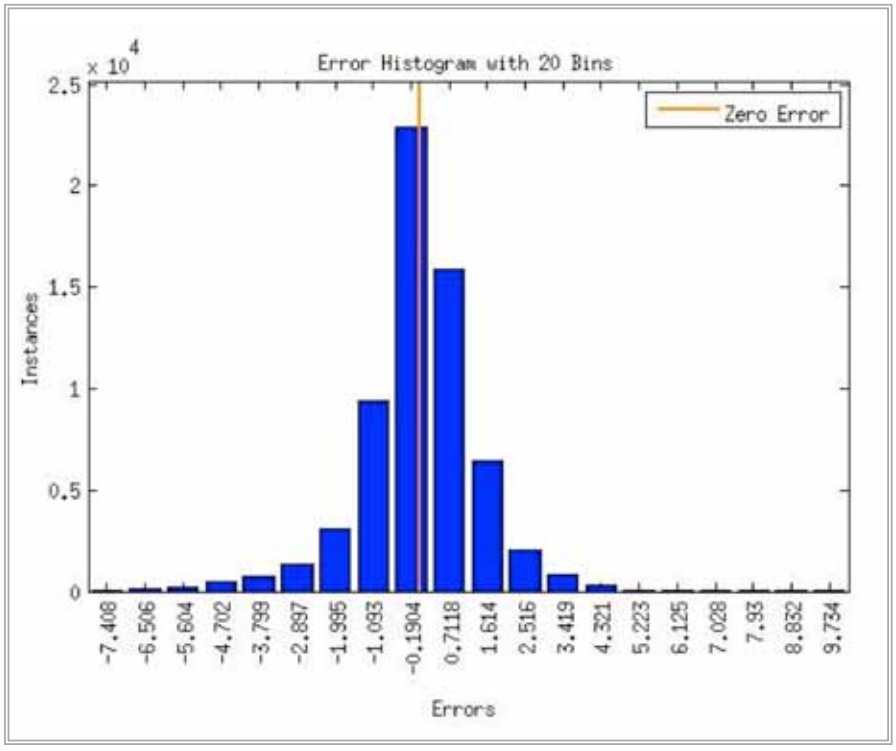


Figure 40 : Histogramme des erreurs enregistrées entre le jeu de données bathymétriques recueillies face à la bande Avatoru-Tiputa et la bathymétrie prédite tirée du RNA. Le trait vertical marron correspond à la situation « aucune erreur ».

Le RNA a ensuite été appliqué à l'ensemble des pixels dans la zone peu profonde du lagon. De plus, les données bathymétriques extraites pour la partie dissimulée par des nuages (nord-est du lagon) ont été retirées. La Figure 41 et la Figure 45 présentent les données bathymétriques obtenues.

En vue d'améliorer encore la bathymétrie prédite, on s'est employé à intégrer dans les paramètres d'entrée du réseau le type de fond associé à chaque pixel. Toutefois, utiliser une classification non supervisée par la méthode des k-moyennes entraîne des erreurs qui se répercutent dans les données de sortie du réseau. D'autres méthodes seront prochainement mises à l'essai.

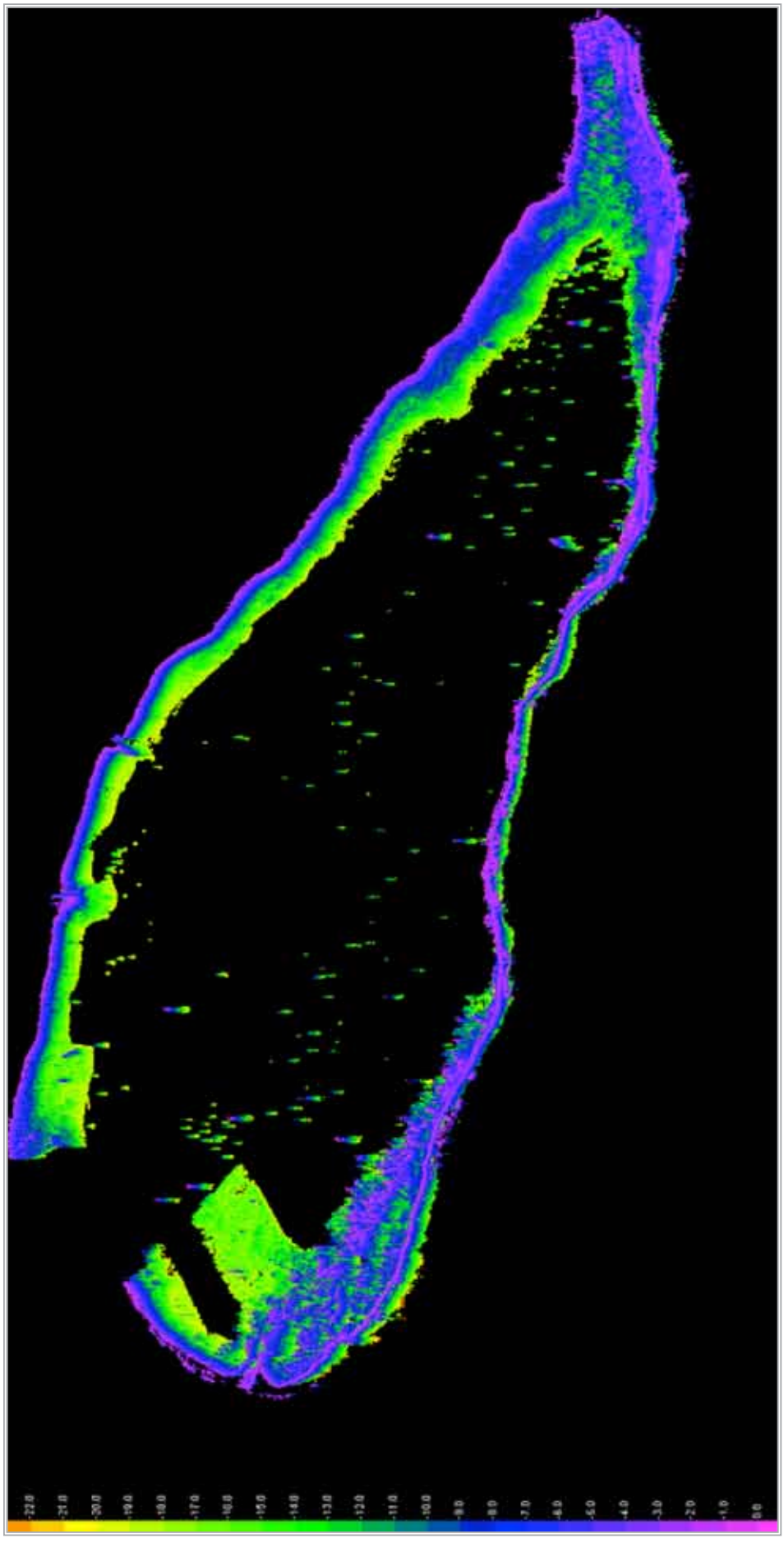


Figure 41 : Représentation tridimensionnelle de la bathymétrie dérivée du lagon de Rangiroa. Profondeur en mètres, du moins profond (en mauve) au plus profond (en vert).

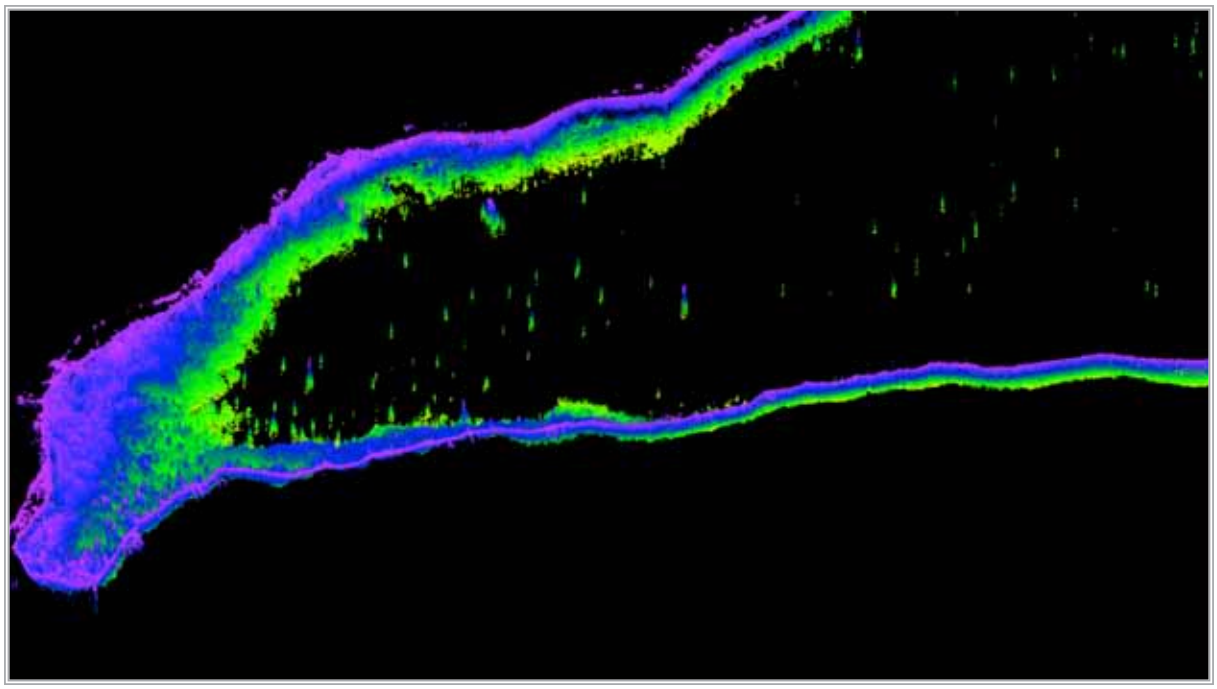


Figure 42 : Représentation tridimensionnelle de la bathymétrie dérivée dans la partie orientale du lagon.

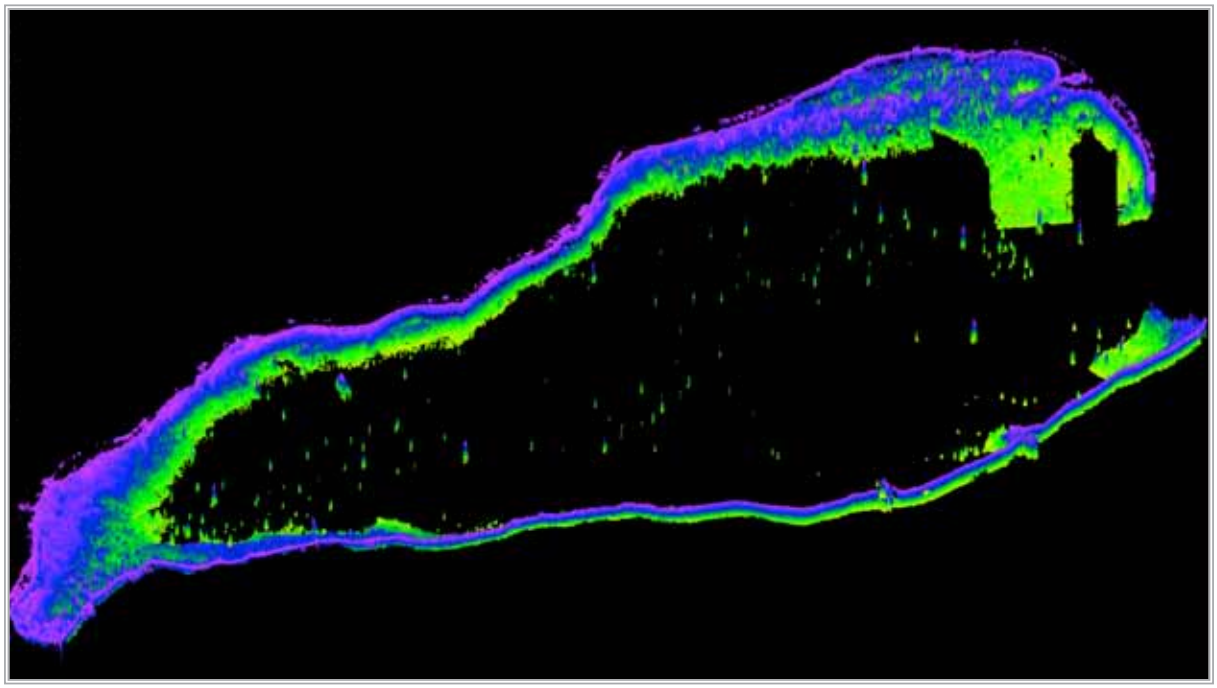


Figure 43 : Représentation tridimensionnelle de la bathymétrie dérivée du lagon de Rangiroa (perspective nord-est).

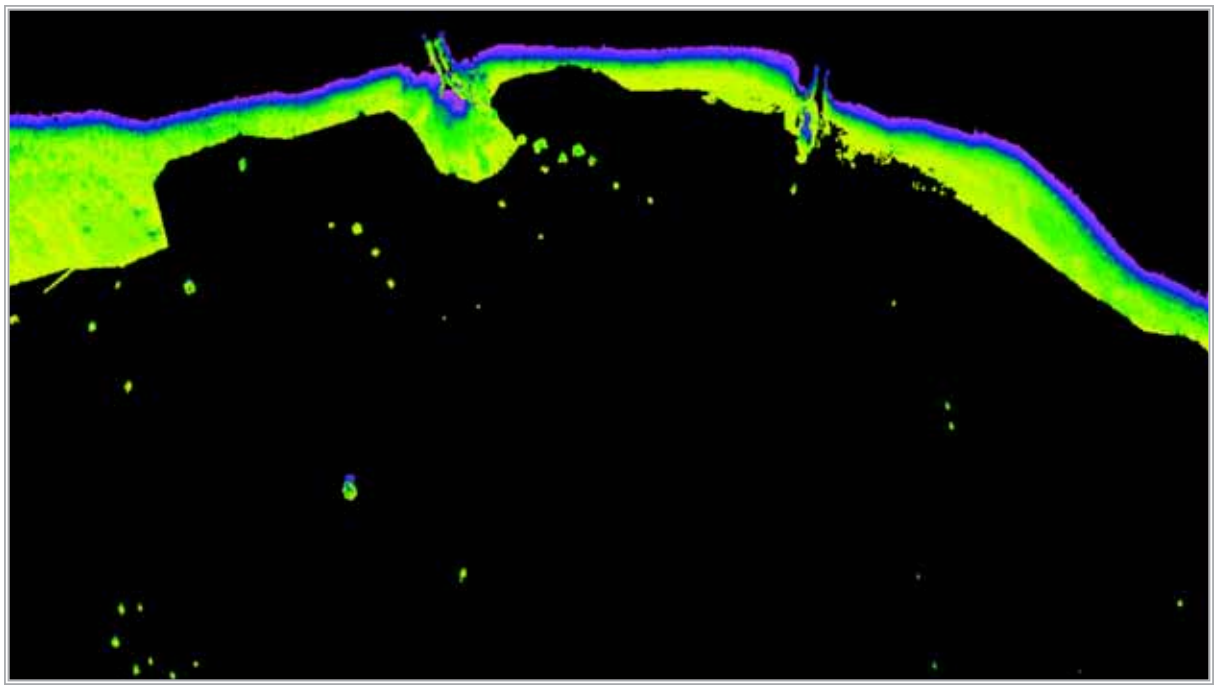


Figure 44 : Représentation tridimensionnelle de la bathymétrie dérivée. Gros plan sur la bande Avatoru-Tiputa (perspective sud).

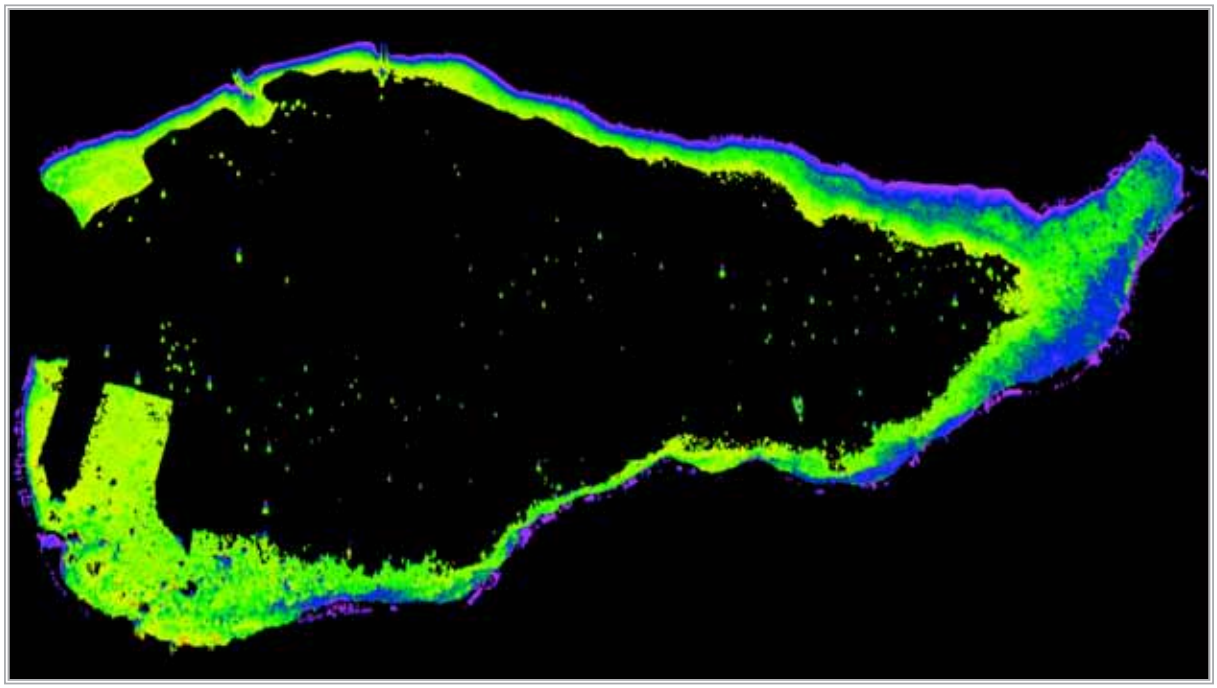


Figure 45 : Représentation tridimensionnelle de la bathymétrie dérivée du lagon de Rangiroa (perspective sud).

Modèle bidimensionnel couplé de Rangiroa (modèle hydrodynamique et modèle spectral de vague) – Cyclone tropical Orama-Nisha (1983)

SPC CPS

SECRETARIAT OF THE PACIFIC COMMUNITY

SECRÉTARIAT GÉNÉRAL DE LA COMMUNAUTÉ DU PACIFIQUE